

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

含綠能之區域電網故障偵測及保護電驛動態設定
Fault detection and dynamic setting of protective relay for
distributed area

計畫編號：108A002

受委託機關(構)：國立中央大學

計畫主持人：陳正一

聯絡電話：03-4227151 轉 34526

E-mail address：cichen@ce.ncu.edu.tw

協同主持人：談光雄

研究期程：中華民國 108 年 2 月至 108 年 12 月

研究經費：新臺幣 76 萬元

核研所聯絡人員：劉力源

報告日期： 108 年 12 月 10 日

目 錄

目 錄.....	I
中文摘要.....	1
ABSTRACT.....	2
壹、計畫緣起與目的.....	3
貳、研究方法與過程.....	5
一、國內外分散式電源併聯規範(如再生能源併聯規範、IEEE1547、BDEW...等)、故障分析技術及饋線保護協調.....	5
1.1 IEEE 929.....	5
1.2 IEEE1547.....	6
二、電力品質管制標準.....	7
2.1 電壓驟升與驟降.....	7
2.2 驟升與驟降現行管制標準.....	9
三、微電網系統控制策略.....	10
3.1 定功率控制.....	10
3.2 電壓頻率控制.....	11
3.3 下降控制.....	12
四、研究模擬儲能及太陽能發電系統在電壓、頻率或實、虛功率控制操作特性.....	14
4.1 併網模式(實虛功率控制).....	15
4.2 孤島模式(電壓頻率控制).....	17
五、模擬分散式電源在不同運作模式下，當市電電壓及頻率超出併網規範時之故障電壓與電流特性分析.....	21
5.1 市電電壓上升 20%.....	21
5.2 市電電壓下降 20%.....	25
5.3 市電頻率上升至 61Hz.....	29
5.4 市電頻率下降至 59Hz.....	33
5.5 併網時，儲能 VF 控制市電電壓上升 20%.....	37

5.6 併網時，儲能 VF 控制市電電壓下降 20%	42
六、研究故障環境建立及測試與模型驗證	46
6.1 市電發生單相對地故障，故障程度 0.9.....	46
6.2 市電發生兩相對地故障，故障程度 0.9.....	51
6.3 市電發生單相對地故障，故障程度 0.6.....	55
6.4 市電發生兩相對地故障，故障程度 0.6.....	59
七、研究建立故障訊號分析技術	63
7.1 電壓異常檢測與跳脫決策法.....	64
7.2 偵測系統.....	69
八、饋線主幹(FCB、FTU)、分歧線(CB、FUSE、FI)與微電網(ACB) 之動態保護協調設計研究	87
參、主要發現與結論.....	91
目前研究成果.....	91
肆、參考文獻.....	93

中文摘要

本計畫主要目標為研究區域電網故障偵測及保護電驛動態設定之研究，為達此目的本計畫將研究分散式電源併聯、故障分析技術及饋線保護協調相關規範，並依據核能所微電網系統為基礎，建立小型微電網系統，其微電網系統包含太陽能發電系統、儲能系統與負載。並依此探討分散式電源在不同運作模式下，當市電電壓及頻率超出併網規範時之故障電壓與電流特性分析。此外，本計畫亦探討分析饋線主幹、分歧線與微電網之動態保護協調設計，提出故障訊號分析技術、故障環境建立測試與模型驗證。

關鍵字：故障偵測、分散式電源、微電網。

Abstract

The main objective of this project is to study the fault detection and dynamic setting of protective relay for distributed area. To achieve this goal, the grid-connected standard for distributed generator, fault analysis technology and feeder protection specifications are researched in this project. Moreover, the microgrid system of the institute of Nuclear Energy Research (INER), including PV system, storage system and loads, is adopted to established the simulation models. When the voltage and frequency of the power grid exceed the grid connection specifications, the voltage and current characteristics of the distributed generators under different operation modes are discussed in this study based on the established models. In addition, the analysis of the dynamic protection coordination design of the feeder, the divergent line and the microgrid will be studied in this project to provide the fault signal analysis technology, fault environment establishment test and model verification.

Keywords : Fault detection, distributed generator, microgrid.

壹、計畫緣起與目的

再生能源與市電併聯系統中，再生能源將產生的電能透過電力電子轉換器將電能回饋市電，於市電併聯的同時，最重要之技術除了同步併網之外，孤島偵測也是分散式電源與市電併聯之重要課題之一，孤島運轉現象系指與市電發生異常後分散式發電系統仍然持續運轉供電，此時負載的能量完全由分散式電源所供給，此現象即為孤島運轉[1]。一旦發生孤島運轉，將對人員安全產生威脅[2]；在孤島運轉的同時，由於系統將失去市電之電壓、電流、頻率當作參考訊號，所以分散式電源系統將產生不穩定之電源，若不即時將系統與其他負載切離，會使得一些敏感性電器用品受到損害[3]。然而在孤島偵測法中被動式孤島偵測法實行方式簡易，但卻存在著無法被偵測或偵測時間過長的情形[4, 5]，無法通過安全規範 IEEE 929 及 IEEE 1547[6, 7]之要求。

美國是最先開始微電網研究的國家，「美國電力安全技術委員會」提出的微電網概念在全世界具有權威地位。美國現在已經形成了“對等”以及“隨插即用”的控制和設計思路，這種思路深刻影響著其他國家的微電網的發展。在微電網控制演算法架構方面，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[8, 9]：(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*)。另外以系統層級亦可區分為下列控制模式：(1) 主、從控制

(Master-Slave Control)、(2)分級控制(Hierarchical Control)[10, 11]。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。綜上所述，目前微電網的技術發展速度很快，可選擇的控制方法也很多，基本上能保證在各種環境要求下對微電網運行可靠控制。

在全球能源危機和環境問題逐漸浮現的狀態下，本計畫將針對分散式發電和微電網併網、饋線保護協調與故障特性進行研究，主要目標為研究區域電網故障偵測及保護電驛動態設定之研究，為達此目的本計畫將研究分散式電源併聯、故障分析技術及饋線保護協調相關規範，並依據核能所微電網系統為基礎，建立小型微電網系統，其微電網系統包含太陽能發電系統、儲能系統與負載。並依此探討分散式電源在不同運作模式下，當市電電壓及頻率超出併網規範時之故障電壓與電流特性分析。此外，本計畫亦探討分析饋線主幹、分歧線與微電網之動態保護協調設計，提出故障訊號分析技術、故障環境建立測試與模型驗證。

貳、研究方法與過程

本計畫主要研究區域電網故障偵測及保護電驛動態設定之研究，為達此目的本計畫將研究分散式電源併聯、故障分析技術及饋線保護協調相關規範，並依據核能所微電網系統為基礎利用 Matlab/Simulink 建立模組驗證微電網系統性能，其中微電網系統包含太陽能發電系統、儲能系統與負載。並依此探討分散式電源在不同運作模式下，當市電電壓及頻率超出併網規範時之故障電壓與電流特性分析。此外，本計畫亦探討分析饋線主幹、分歧線與微電網之動態保護協調設計，提出故障訊號分析技術、故障環境建立測試與模型驗證，相關規範、控制法則與模擬驗證說明如後：

一、研究國內外分散式電源併聯規範(如再生能源併聯規範、IEEE1547、BDEW...等)、故障分析技術及饋線保護協調相關文獻

1.1 IEEE 929[6]

對於 IEEE 929 規範之重點有兩部分，第一為電力品質，第二為安全與保護裝置。在電力品質部分包含電壓正常範圍、頻率正常範圍、電壓驟降、諧波限制與功率因數的探討，另外在安全與保護裝置部分包含電壓變動、頻率變動、孤島運轉保護。

(1)電力品質：

1. 電壓正常操作範圍：電壓正常操作範圍為標準電壓的 88% ~ 110%。

2. 電壓閃爍：任何電壓驟降的情形在換流器連結至市電系統與客戶端之共同耦合點，不應超過 IEEE 929 規範所制定的最大限制

條件。

3. 頻率：頻率正常操作範圍為 59.3Hz ~ 60.5Hz。

(2)安全與保護規範：

1. 不正常市電狀況之影響：以市電端與客戶端的共同耦合點 PCC 為量測點，當電壓與頻率超過正常電壓的最大範圍限制時，即判斷為故障發生，並立即啟用保護電驛將分散式發電系統與市電端解聯。

2. 孤島運轉保護：由於孤島運轉之情形必須靠市電併聯之換流器偵測。當換流器偵測到孤島運轉條件時，換流器將會適時中斷系統與負載的供電。借由上述之頻率與電壓正常操作範圍來降低孤島運轉發生的可能。

3. 市電重新連結：當市電發生中斷，欲重新恢復供電時，分散式發電系統需在 5 分鐘後恢復供電。

1.2 IEEE 1547[7]

(1) 電壓測試保護條件：對於 IEEE1547 電壓部份，需利用其併網電壓之有效值作為偵測判斷條件，當電壓於表 1.1 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需停止輸出功率，其中所制定之最大偵測時間長度為當市電端之不正常情形開始至系統停止輸出功率至市電端間之時間長，而電壓百分比意指相較於正常操作值之電壓值。

表 1.1 IEEE 1547 制定之電壓偵測規範表

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

(2) 頻率保護測試條件：當系統頻率於表 1.2 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需停止輸出功率，以 30kW 為分界，其最大之偵測時間有所不同，當系統大於 30kW 時，頻率範圍操作點又分為固定與可調整之兩種不同條件，詳細之規範範圍於表 2 所示，其最大偵測時間定義與電壓偵測條件相同。

表 1.2 IEEE 1547 制定之頻率偵測規範表

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

二、電力品質管制標準

2.1 電壓驟升與驟降

由於電力系統輸電線遭受雷擊、鹽害等天然災害或發生事故所造成的輸配電設備或線路故障，故障電流流經鄰近線路，或是大功

率負載的變動皆是導致電壓驟降與驟升的成因。

(1) 電壓驟降(Sag)：基頻有效值之 0.1 ~ 0.9 pu 範圍，且時間持續 0.5 週波(cycle)至 1 分鐘內，如圖 2.1 所示。

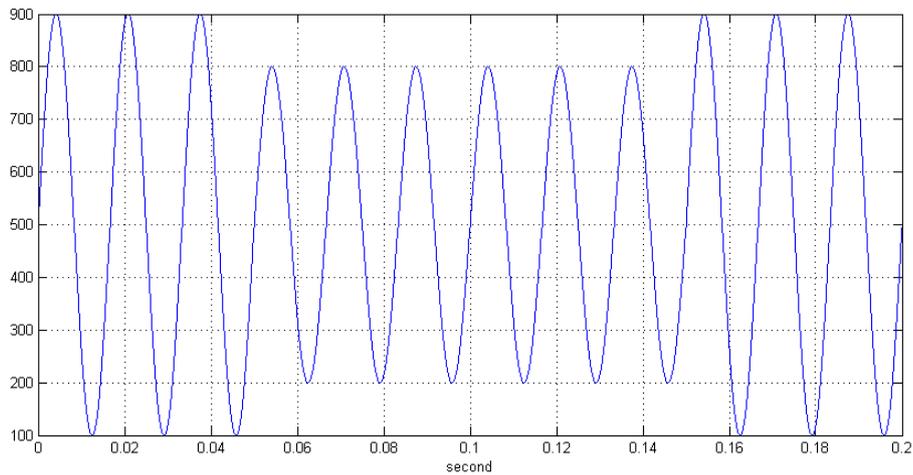


圖 2.1 電壓驟降

(2) 電壓驟升(Swell)：電壓超出基頻有效值之 10%，時間持續 0.5 週波至 1 分鐘內，如圖 2.2 所示。

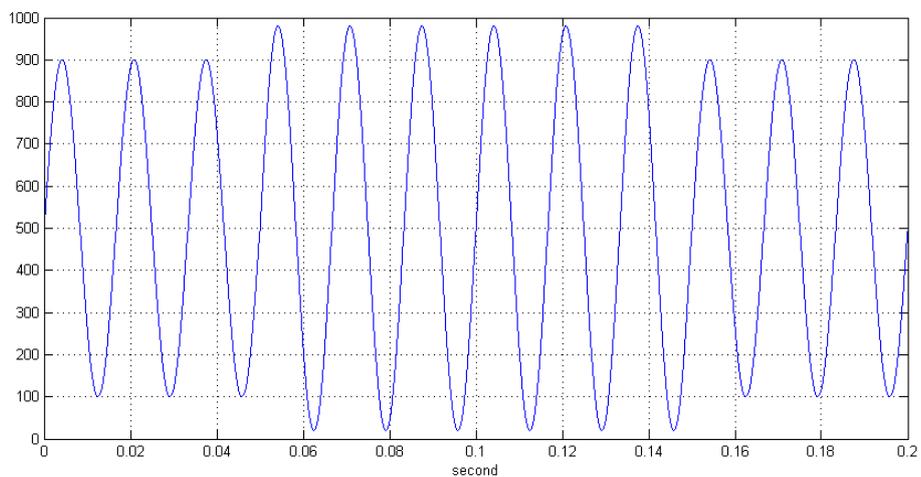


圖 2.2 電壓驟升

2.2 驟升與驟降現行管制標準

根據 IEEE Std 1159-2009 Table 2 (IEEE Recommended practice for monitoring electric power quality)，將不同的驟降(升)情形做明確的定義，如表 2.1，並依照電腦產業協會(Computer Business Equipment Manufacturers Association, CBEMA)所提供的商用供電系統之最大承受暫態過壓容許持續時間曲線(圖 2.3)，可以清楚了解當遇到驟降(升)情況可容忍至何等範圍，而不必切離市電。

表 2.1 電壓驟降、驟升定義表(短時間變動情況下)

Type		Duration	Magnitude
Instantaneous	sag	0.5~30 Cycles	0.1~0.9pu
	swell		1.1~1.8pu
Momentary	sag	30 Cycles~3s	0.1~0.9pu
	swell		1.1~1.4pu
Temporary	sag	3s~1min	0.1~0.9pu
	swell		1.1~1.2pu

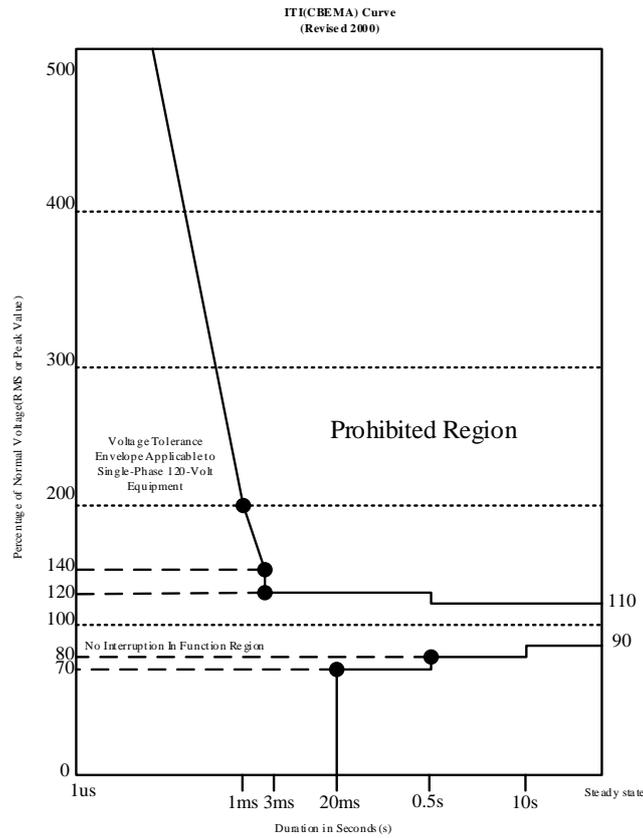


圖 2.3 CBEMA 電壓驟降容忍範圍及持續時間圖

三、微電網系統控制策略

3.1 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 3.1 所示，按照預先設定的實、虛功命令做輸出，實功率命令 P_m^* 與實功率 P_m 比較及虛功率命令 Q_m^* 與虛功率 Q_m 比較後，經過 PI 控制器產生 q 軸命令電流 i_q^* 與 d 軸命令電流 i_d^* ，與變流器輸出 i_q 、 i_d 電流比較後經過 PI 控制器再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

固定座標轉換後，產生三相電壓命令 u_{coma} 、 u_{comb} 、 u_{comc} 與三角波做比較後，得到開關控制訊號，利用功率開關元件達到控制實功率與虛功率的目的。

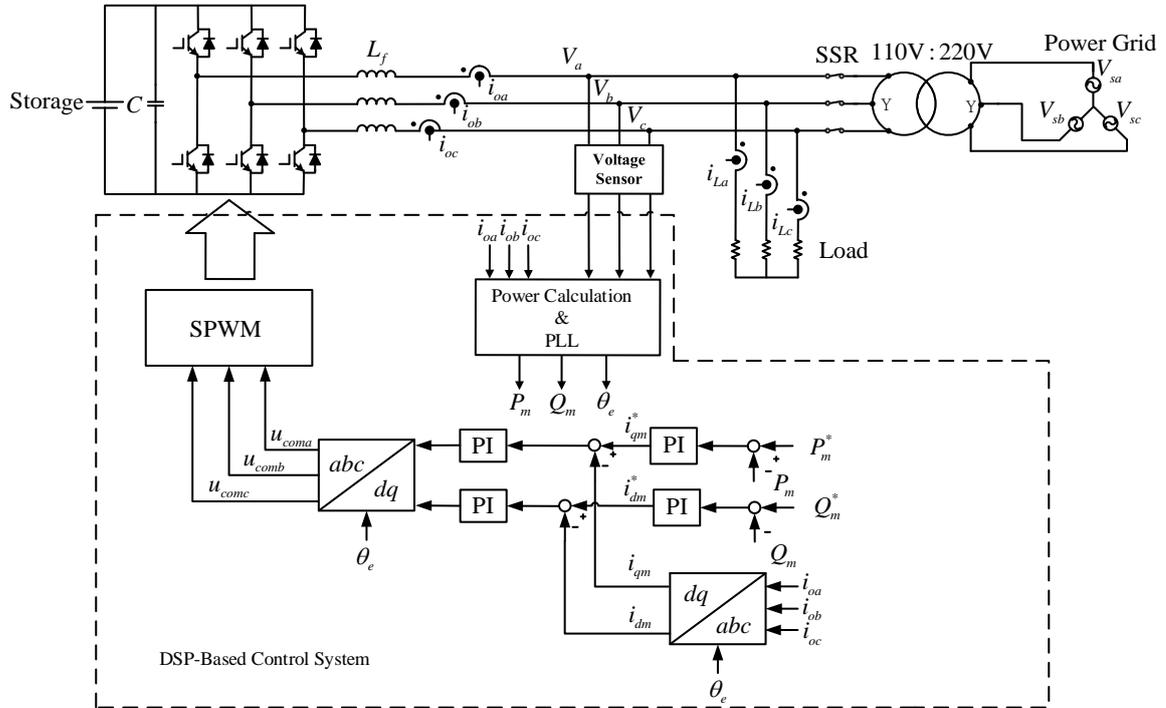


圖 3.1 PQ控制架構圖

3.2 電壓頻率控制

當市電發生異常時，微電網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，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 3.2 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^* 與輸出電壓 V 比較後，經過 PI 控制器產生命令電流 i_q^* ，而頻率命令 f^* 與頻率 f 比較後，經

當變流器輸出實功率為 P_{\max} 和虛功率為 Q_{\max} 時，變流器輸出頻率為 f_{\min} 、幅值為 V_{\min} ，即運行在曲線圖中的 B 點，通過下降曲線可以觀察出，頻率與實功率以及電壓與虛功率呈現依比例關係即為下降係數 k_p 與 k_Q 。

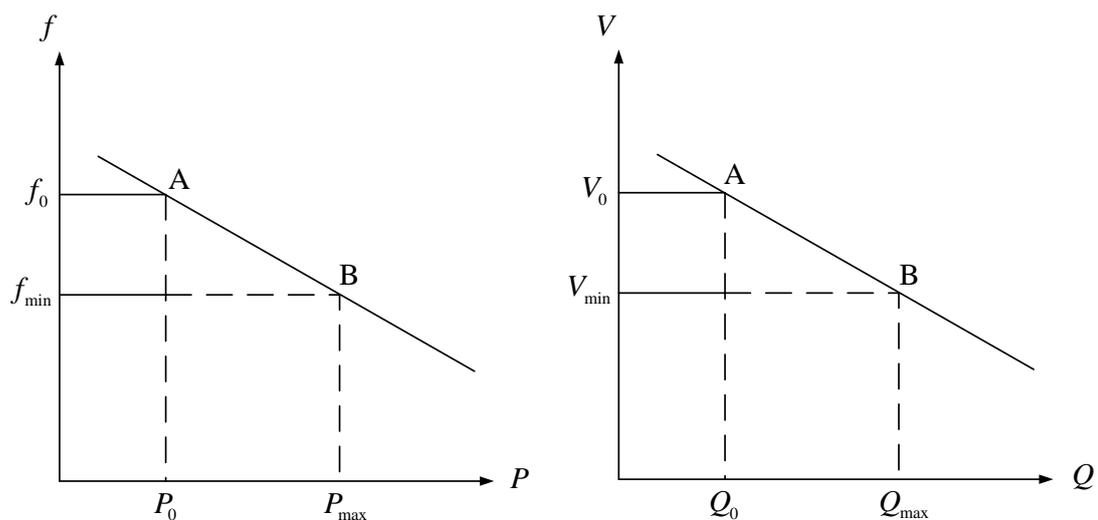


圖 3.3 電壓頻率下降特性曲線圖

四、研究模擬儲能及太陽能發電系統在電壓、頻率或實、虛功率控制操作特性

圖 4.1 為本計畫依據核能所微電網系統所建立之 Matlab/Simulink 模組，其分為三個部分，第一部份為太陽能(PV)系統，額定功率為 20 kW，由 DC/DC 與 DC/AC 轉換器組成做，DC/DC 做最大功率點(MPPT)追蹤，DC/AC 做直流鏈電壓穩定；第二部份為儲能系統(ESS)，額定功率為 50kW，由 DC/DC 與 DC/AC 轉換器組成做，DC/DC 做直流鏈電壓穩定，DC/AC 在併網運轉時做實、虛功率控制，孤島運轉時做電壓、頻率控制；第三部份為負載，此系統模型負載為 30 kW。微電網系統在併網運轉時，ESS 及 PV 皆做定功率控制，兩系統於 AC 側併聯於市電。微電網系統在孤島運轉時，ESS 即微電網控制主機負責穩定微電網的電壓與頻率，並依據負載所需調整輸出功率；從屬部分 PV 仍固定輸出功率。

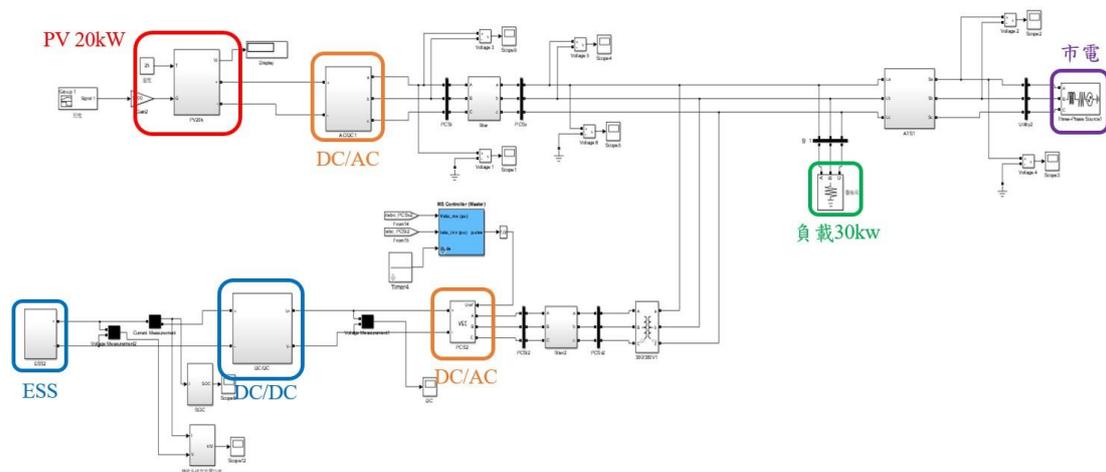


圖 4.1 微電網系統模型

4.1 併網模式(實虛功率控制)

微電網系統操作在併網模式時，其架構如圖 4.1 所示，儲能系統做 PQ 控制，太陽能系統做 MPPT 控制，兩系統於 AC 側併聯於市電，將觀察各分散式電源之實、虛功率與電壓電流暫態之變化。圖 4.2-圖 4.5 分別為市電、負載、PV、儲能之電壓、電流、實功、虛功。本模擬情境係假設，當日日照充足($1000\text{W}/\text{m}^2$)時，PV 之 DC/DC 做 MPPT 追蹤，其輸出功率為 20kW ，儲能之 DC/AC 做 PQ 控制，其輸出功率為 15kW ，負載為 30kW 之純電阻性負載，由圖 4.2-圖 4.5 所示可知，分散式電源多餘之 5kW 將輸出至市電。PV 之 DC/AC 做直流鏈電壓控制 400V ，儲能之 DC/DC 做直流鏈電壓控制 400V ，如圖 4.6 所示。

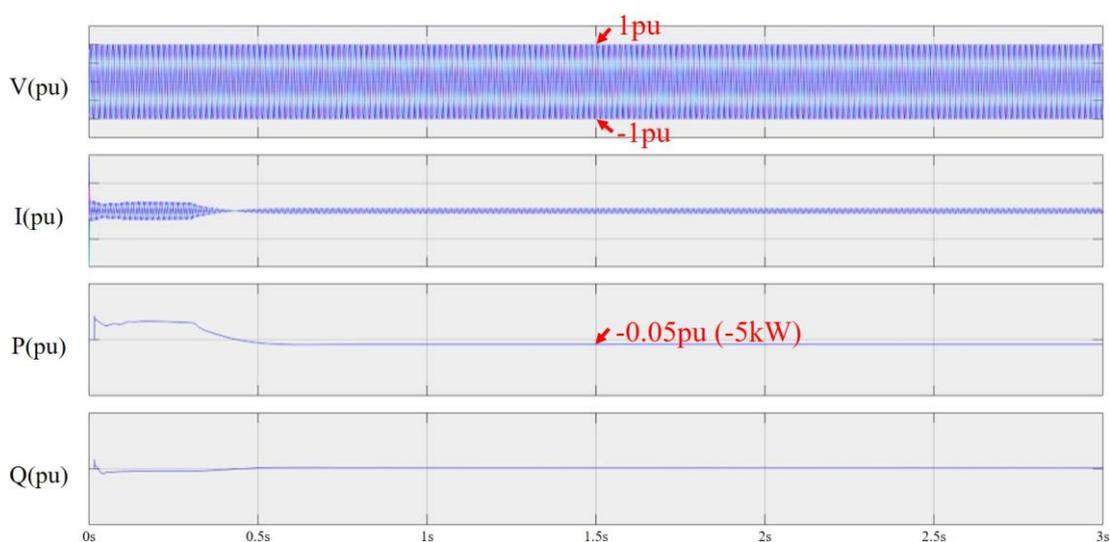


圖 4.2 市電之電壓、電流、實功、虛功

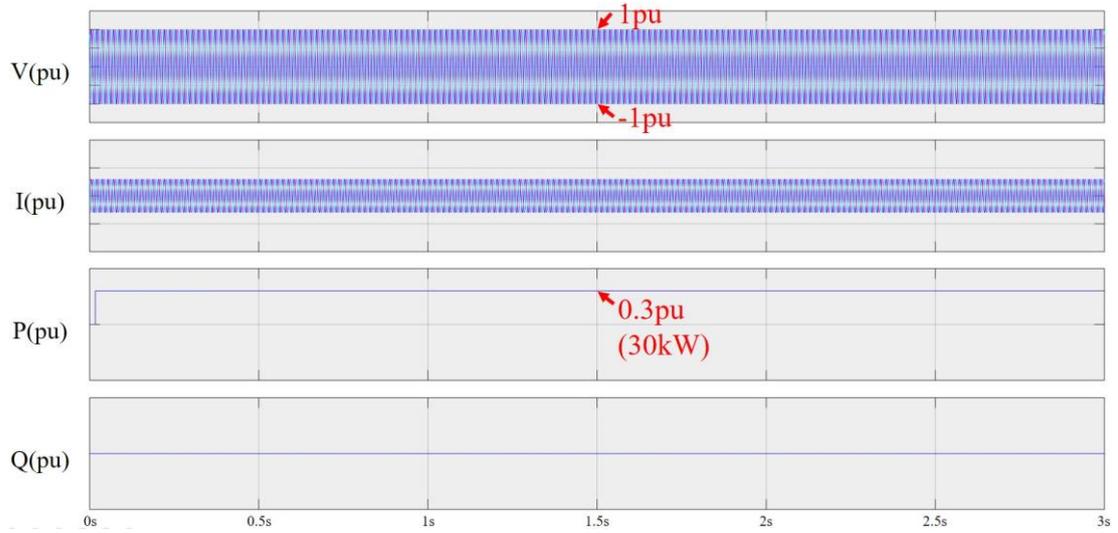


圖 4.3 負載之電壓、電流、實功、虛功

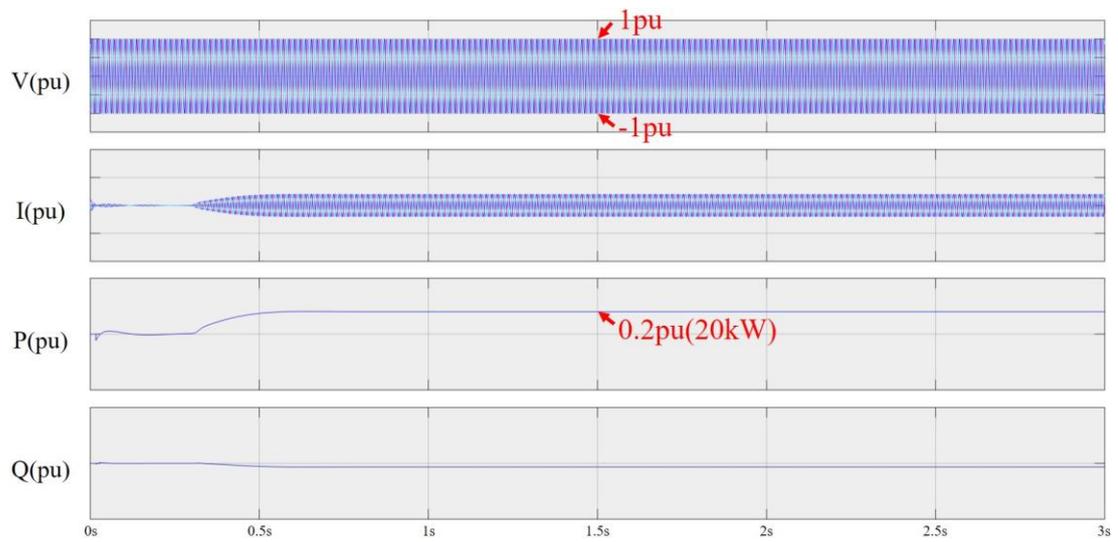


圖 4.4 PV 之電壓、電流、實功、虛功

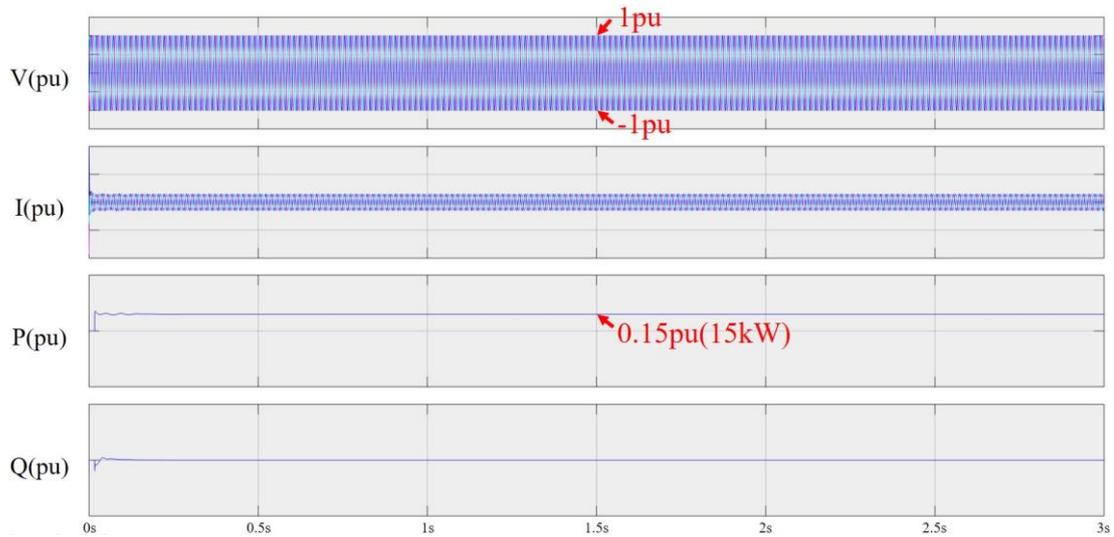


圖 4.5 儲能之電壓、電流、實功、虛功

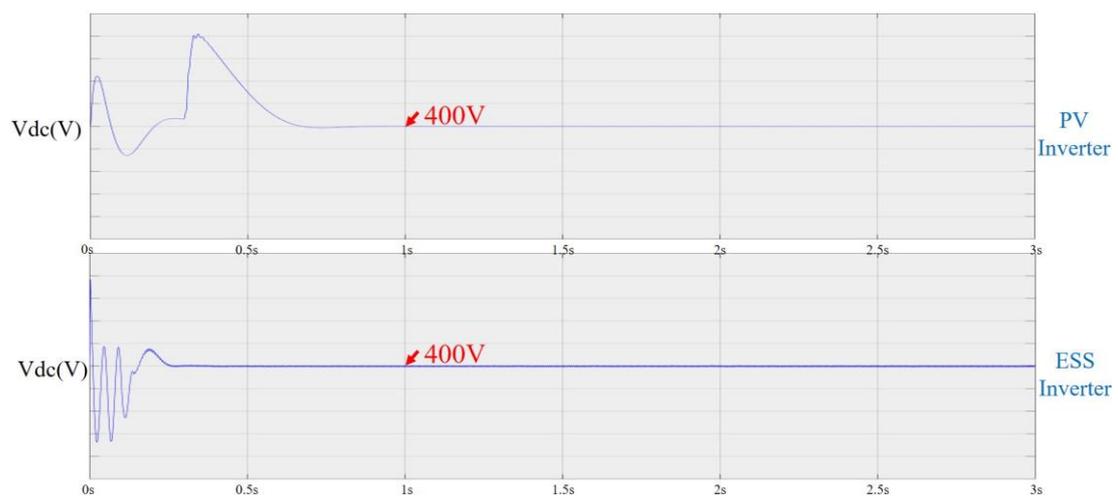


圖 4.6 PV 及儲能之直流鏈電壓

4.2 孤島模式(電壓頻率控制)

微電網系統操作在孤島模式，微電網與市電解聯，模擬架構如圖 4.7 所示，兩系統於 AC 側與市電解聯，儲能系統做 VF 控制，代替市電的功能，太陽能系統做 MPPT 控制，觀察各分散式電源之實

虛功率與微電網電壓電流暫態之變化。圖 4.8-圖 4.10 分別為負載、PV、儲能之電壓、電流、實功、虛功，圖 4.11 為 PV、儲能之直流鏈電壓，圖 4.12 為 PV、儲能之頻率。此模擬條件亦假設日照充足 ($1000W/m^2$) 時，PV 之 DC/DC 做 MPPT 追蹤，其輸出功率為 20kW，負載為 30kW 之純電阻性負載，儲能之 DC/AC 做 VF 控制，輸出線間電壓 220V、60Hz 的三相弦波，並提供剩餘之功率 10kW，以利供需平衡，如圖 4.8-圖 4.10 所示。PV 之 DC/AC 直流鏈電壓控制 400V，儲能之 DC/DC 做直流鏈電壓控制 400V，如圖 4.11 所示。儲能系統維持微電系頻率 60Hz，如圖 4.12 所示。

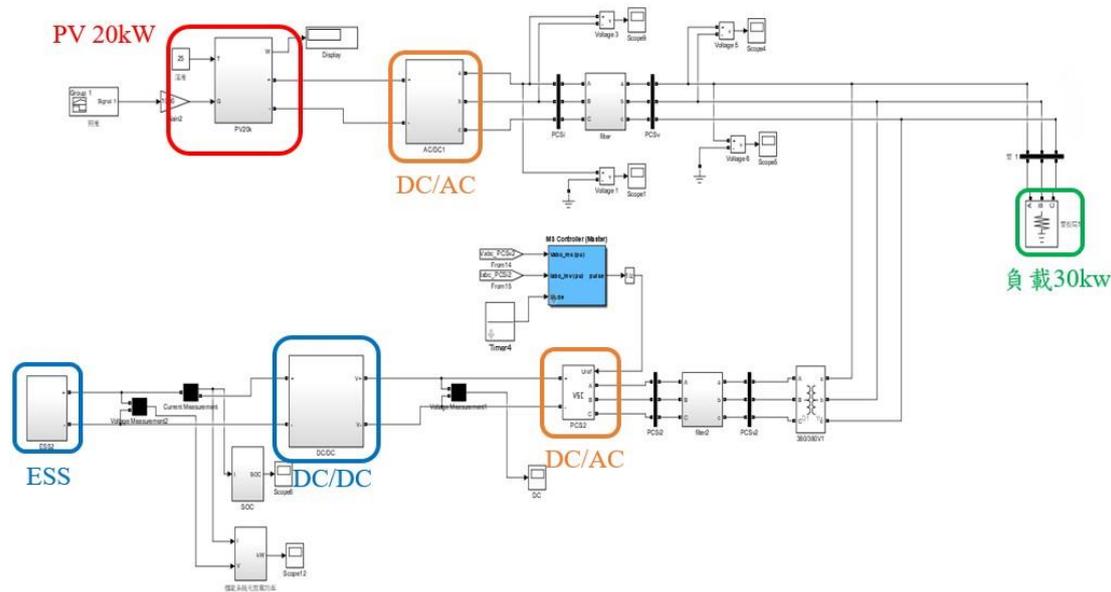


圖 4.7 微電網系統模型 (孤島)

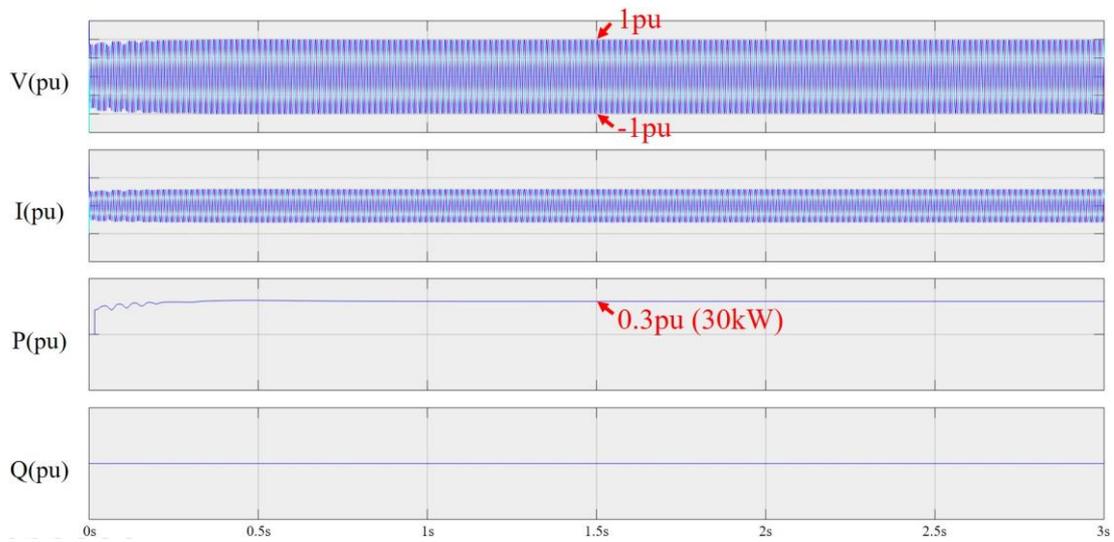


圖 4.8 負載之電壓、電流、實功、虛功

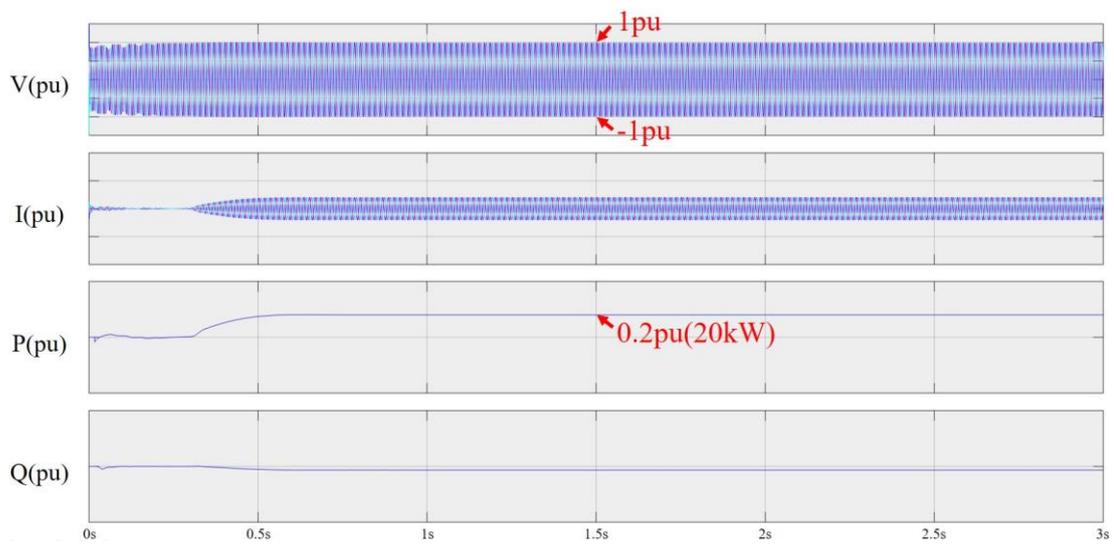


圖 4.9 PV 之電壓、電流、實功、虛功

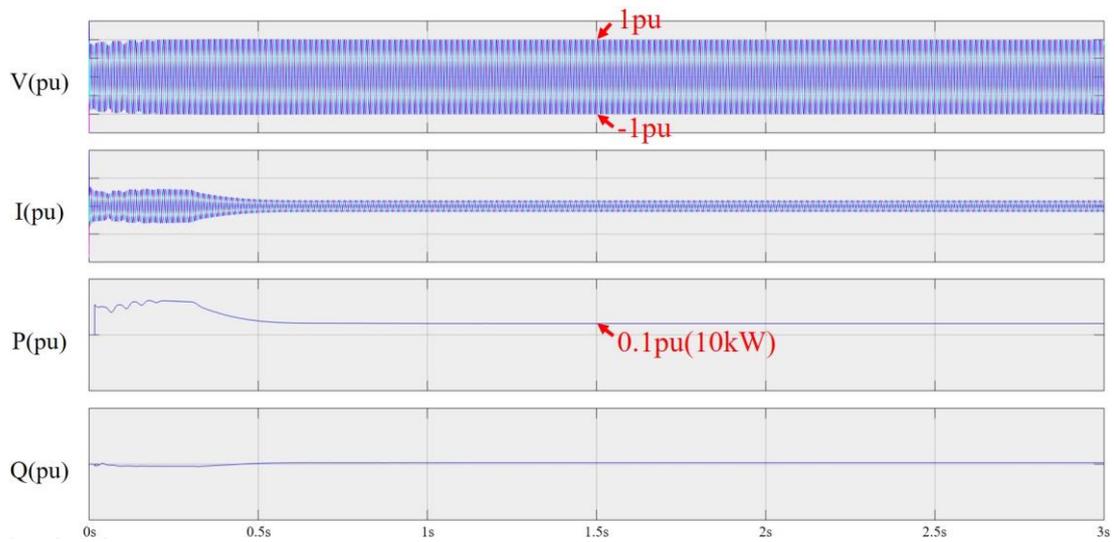


圖 4.10 儲能之電壓、電流、實功、虛功

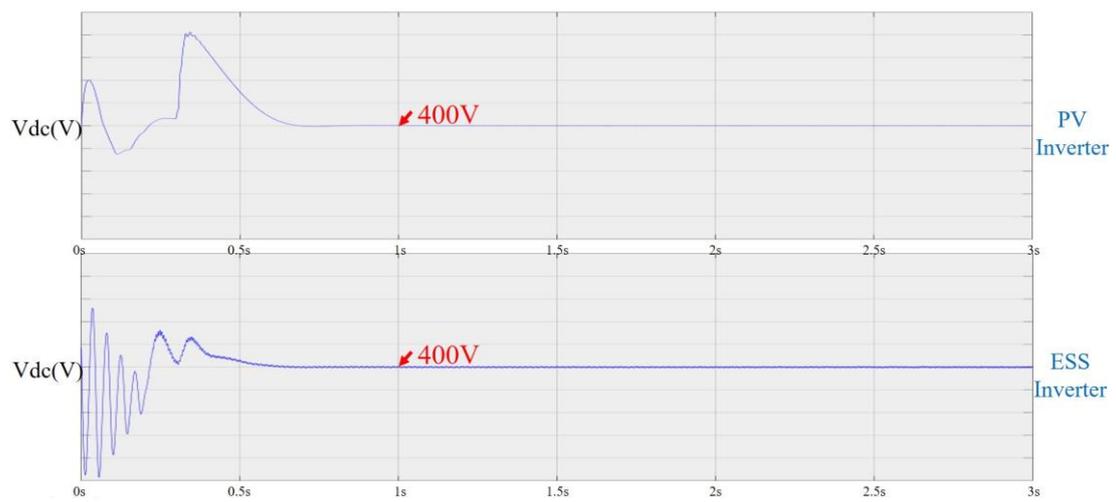


圖 4.11 PV 及儲能之直流鏈電壓

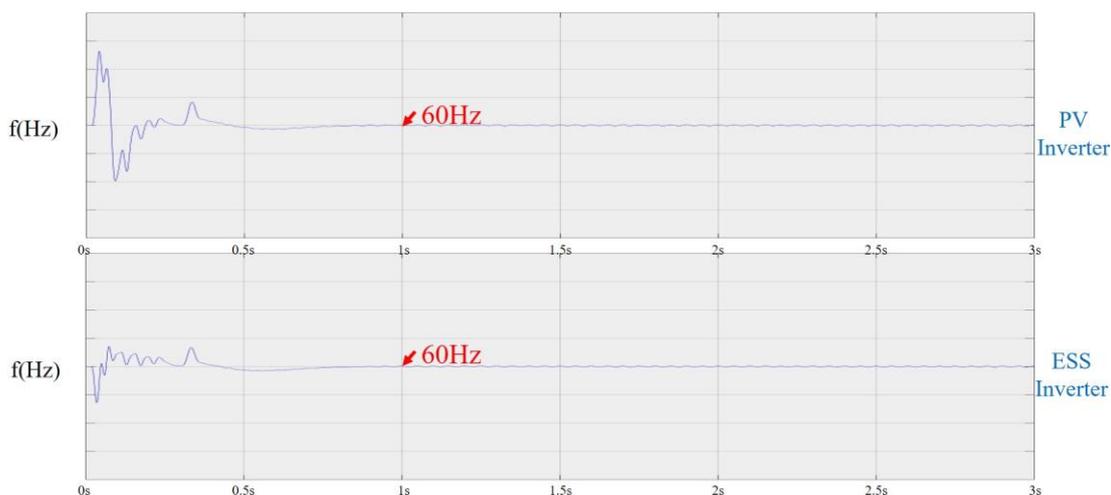


圖 4.12 PV 及儲能之頻率

五、模擬分散式電源在不同運作模式下，當市電電壓及頻率超出併網規範時之故障電壓與電流特性分析

本章節將模擬併網時市電電壓與頻率超出併網規範，觀察各分散式電源之實、虛功率與電壓、電流暫態之變化，另外並探討當儲能系統做 VF 控制，市電電壓超出併網規範時，觀察各分散式電源之實、虛功率與電壓、電流暫態之變化。

5.1 市電電壓上升 20%

此節模擬架構如圖 5.1 所示，兩系統於 AC 側併聯於市電，模擬併網時，儲能系統做 PQ 控制，太陽能系統做 MPPT 控制，市電電壓在 1.5s 超出併網電壓規範上升 20%。

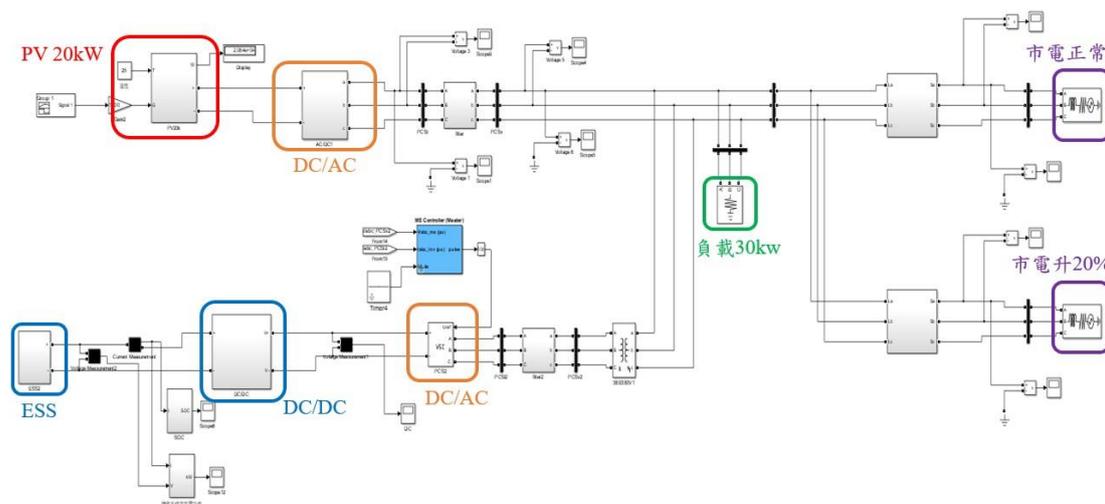


圖 5.1 微電網系統模型 (市電電壓上升 20%)

此模擬情境系假設當日日照充足($1000W/m^2$)時，PV 之 DC/DC 做 MPPT 追蹤，其輸出功率為 20kW，儲能之 DC/AC 做 PQ 控制，其輸出功率為 15kW，圖 5.2-圖 5.5 分別為當市電電壓在 1.5 秒上升 20% 時，市電、負載、PV、儲能之電壓、電流、實功、虛功，圖 5.6 為當市電電壓上升 20% 時，PV、儲能之直流鏈電壓，圖 5.7 為當市電電壓上升 20% 時，市電之頻率。在 1.5s 時，市電電壓的上升導致 PV 與儲能有些微的功率波動，但在很短的時間內變恢復穩定，由於 PV 及儲能系統都是 MPPT 及定功率控制，電壓上升不影響其輸出功率；負載為 30kW 之純電阻性負載，在 1.5s 時，由於電壓上升使其所需功率變為 43kW，市電從吸收功率 5kW 變為提供功率 8kW 給負載。PV 之 DC/AC 做直流鏈電壓控制 400V，儲能之 DC/DC 做直流鏈電壓控制 400V，在 1.5s 時，由於市電電壓上升，直流鏈電壓產生

波動但隨後便恢復 400V，如圖 5.6 所示。在 1.5s 時，由於市電電壓上升，市電頻率受到影響產生震盪，如圖 5.7 所示。

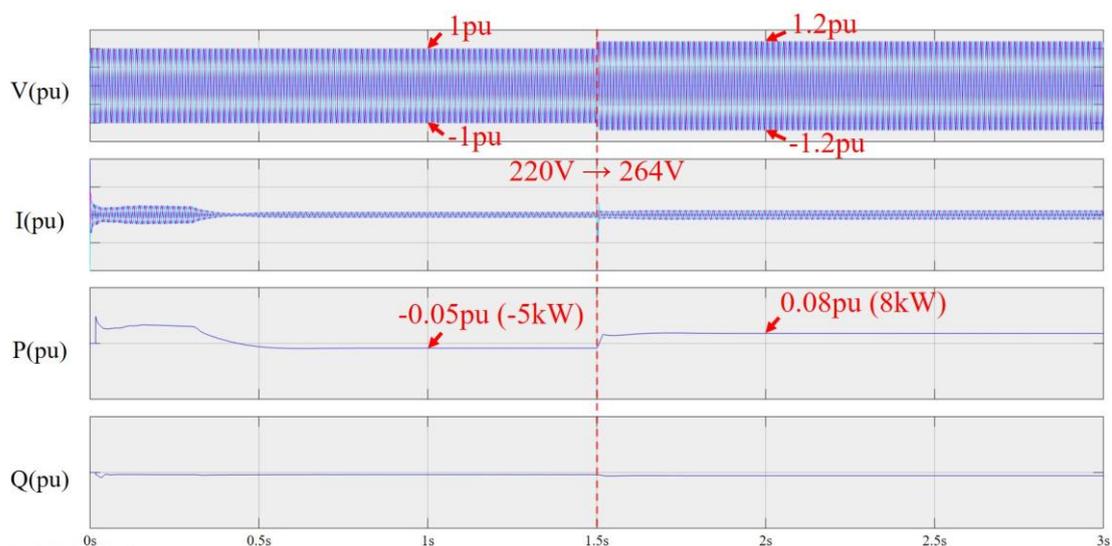


圖 5.2 市電之電壓、電流、實功、虛功

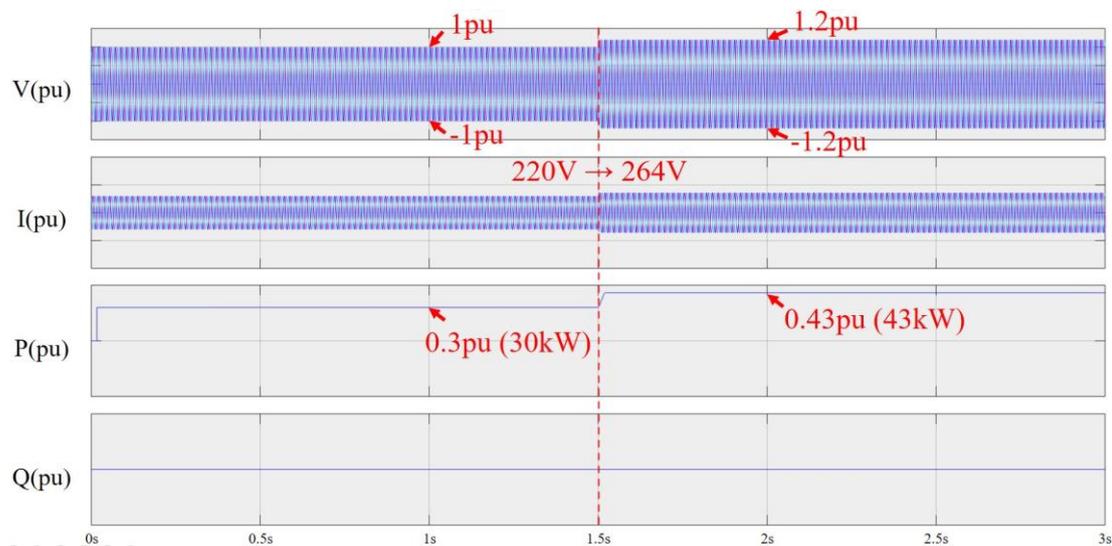


圖 5.3 負載之電壓、電流、實功、虛功

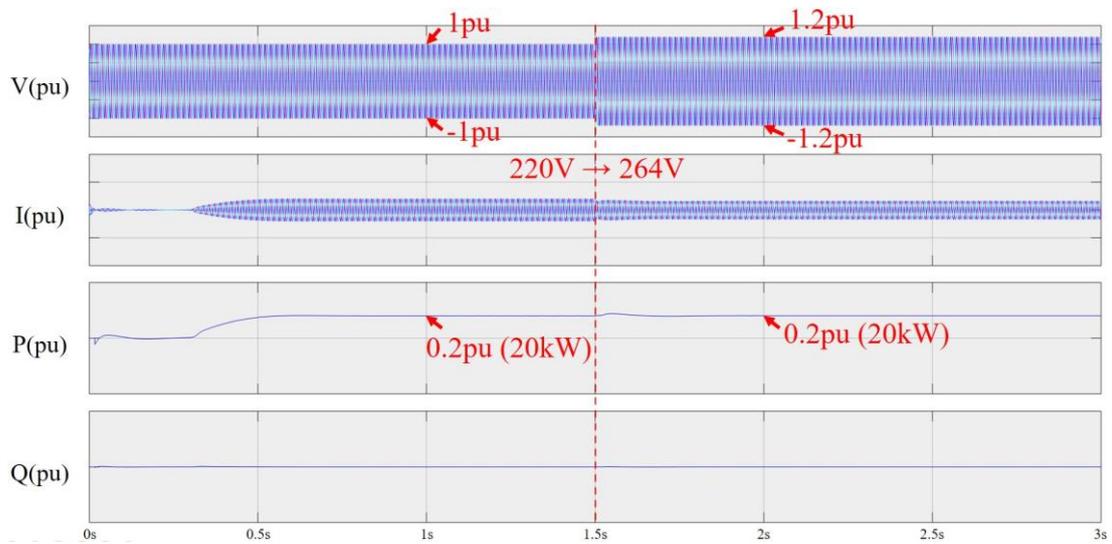


圖 5.4 PV 之電壓、電流、實功、虛功

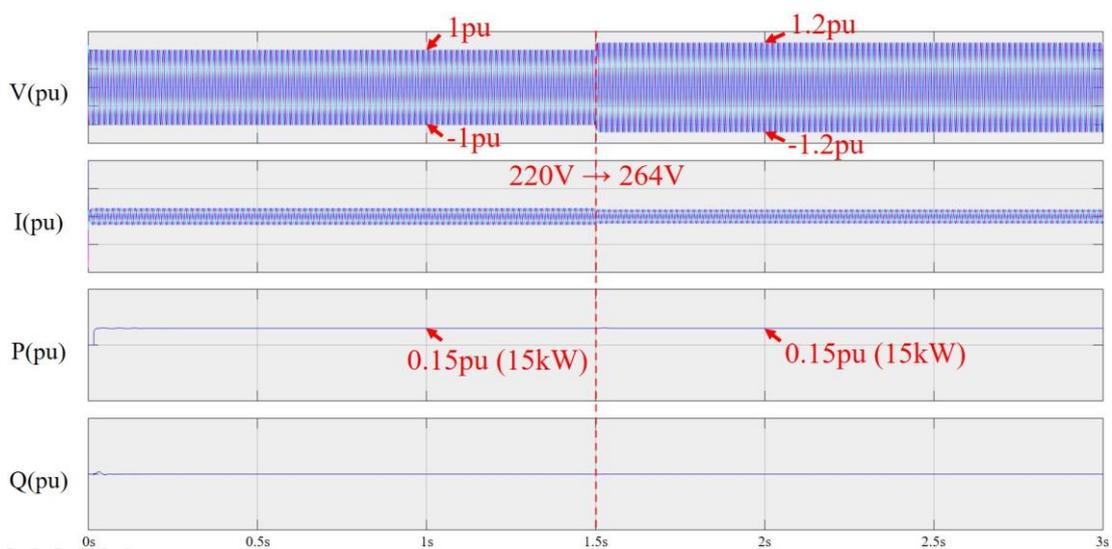


圖 5.5 儲能之電壓、電流、實功、虛功

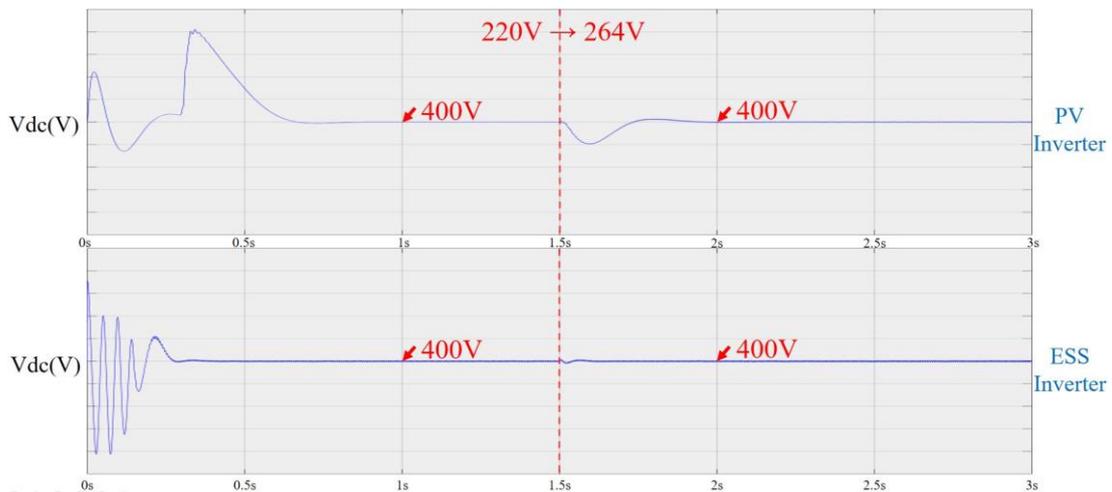


圖 5.6 PV 及儲能之直流鏈電壓

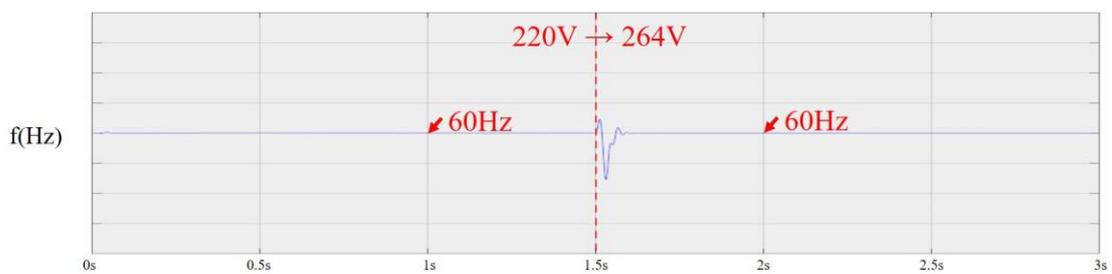


圖 5.7 市電之頻率

5.2 市電電壓下降 20%

此節模擬架構如圖 5.8 所示，兩系統於 AC 側併聯於市電，模擬併網時，儲能系統做 PQ 控制，太陽能系統做 MPPT 控制，市電電壓在 1.5s 超出併網電壓規範下降 20%。

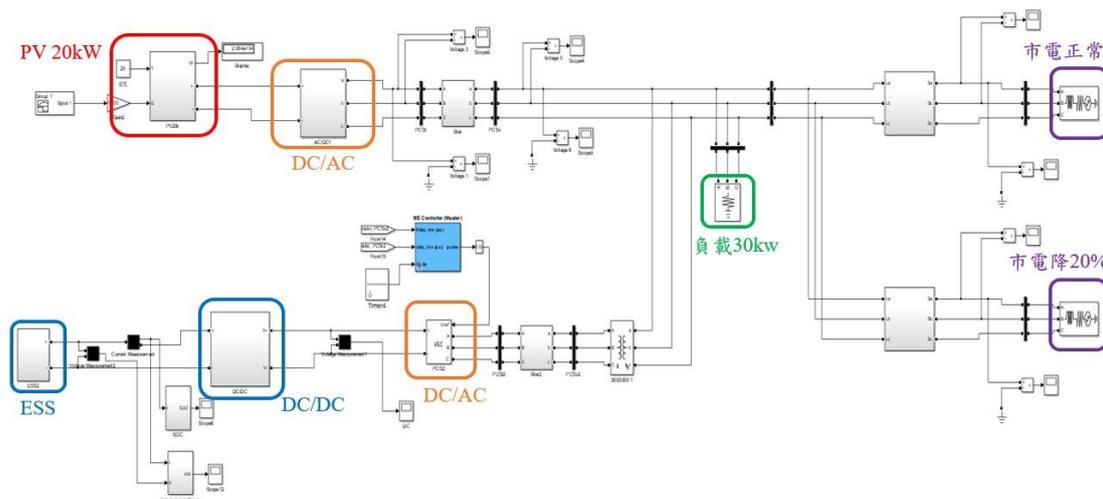


圖 5.8 微電網系統模型 (市電電壓下降 20%)

此節模擬條件為日照充足($1000W/m^2$)時, PV 之 DC/DC 做 MPPT 追蹤, 其輸出功率為 20kW, 儲能之 DC/AC 做 PQ 控制, 其輸出功率為 15kW, 圖 5.9-圖 5.12 分別為當市電電壓下降 20% 時, 市電、負載、PV、儲能之電壓、電流、實功、虛功, 圖 5.13 為當市電電壓下降 20% 時, PV、儲能之直流鏈電壓, 圖 5.14 為當市電電壓下降 20% 時, 市電之頻率。在 1.5s 時, 市電電壓的下降導致 PV 與儲能有些微的功率波動, 但在很短的時間內變恢復穩定, 由於 PV 及儲能系統都是 MPPT 及定功率控制, 電壓上升不影響其輸出功率; 負載為 30kW 之純電阻性負載, 在 1.5s 時, 由於電壓下降使其所需功率變為 19kW, 市電從吸收功率 5kW 變為吸收功率 16kW, 如圖 5.9-圖 5.12 所示。PV 之 DC/AC 做直流鏈電壓控制 400V, 儲能之 DC/DC 做直流鏈電壓控制 400V, 在 1.5s 時, 由於市電電壓下降, 直流鏈電

壓產生波動但隨後便恢復 400V，如圖 5.13 所示。在 1.5s 時，由於市電電壓下降，市電頻率受到影響產生震盪，如圖 5.14 所示。

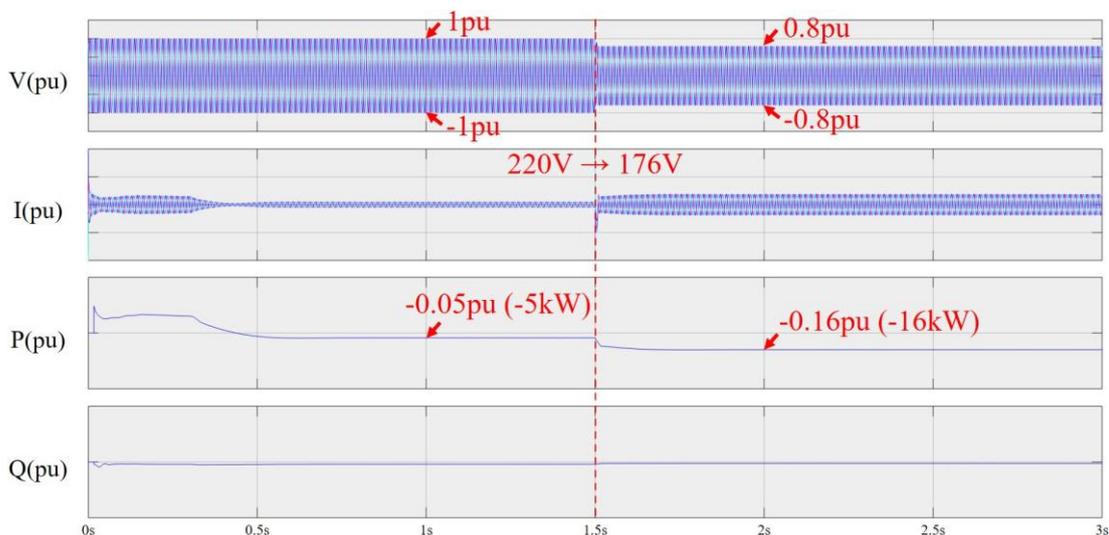


圖 5.9 市電之電壓、電流、實功、虛功

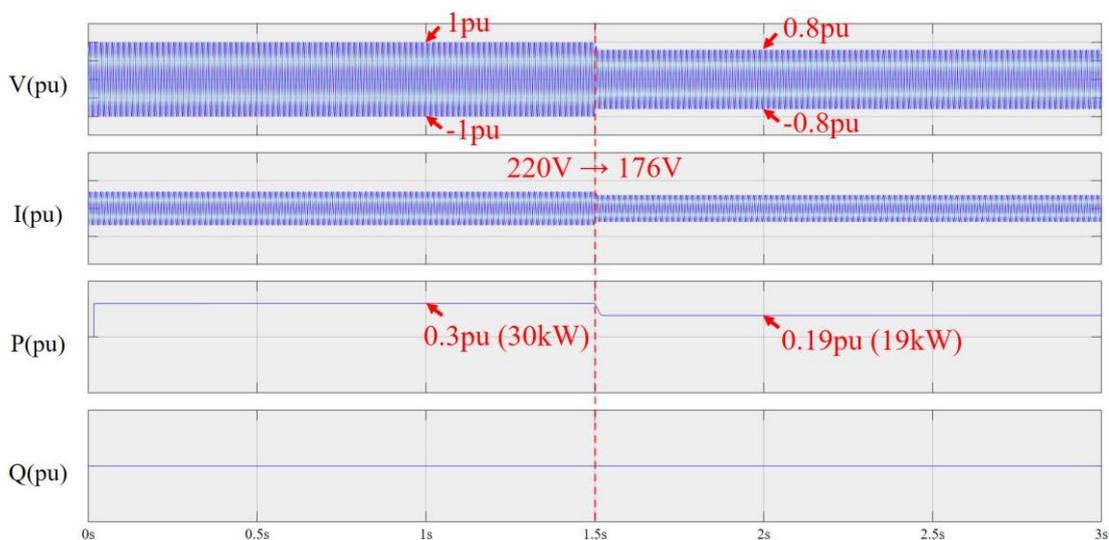


圖 5.10 負載之電壓、電流、實功、虛功

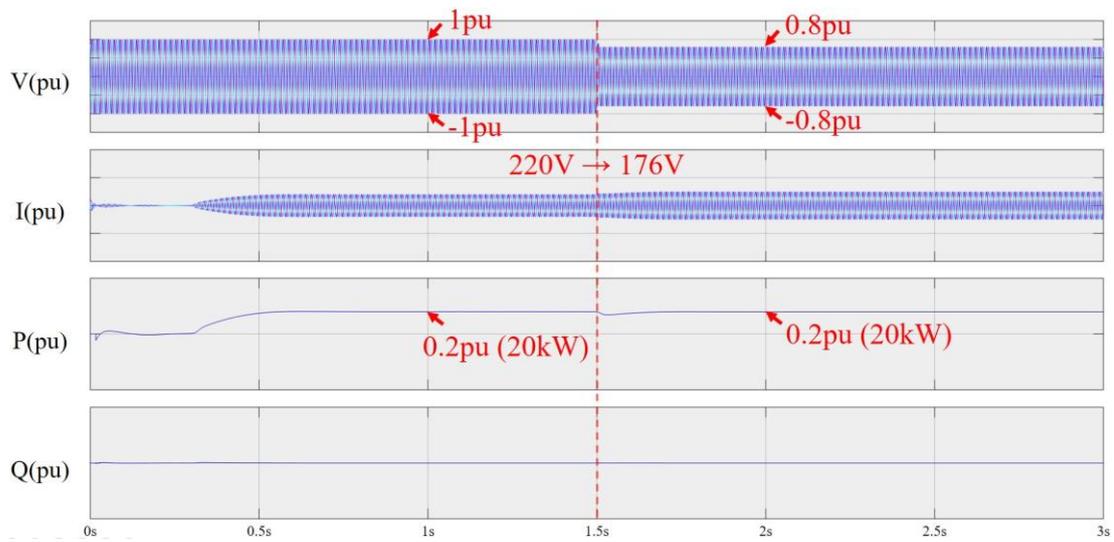


圖 5.11 PV 之電壓、電流、實功、虛功

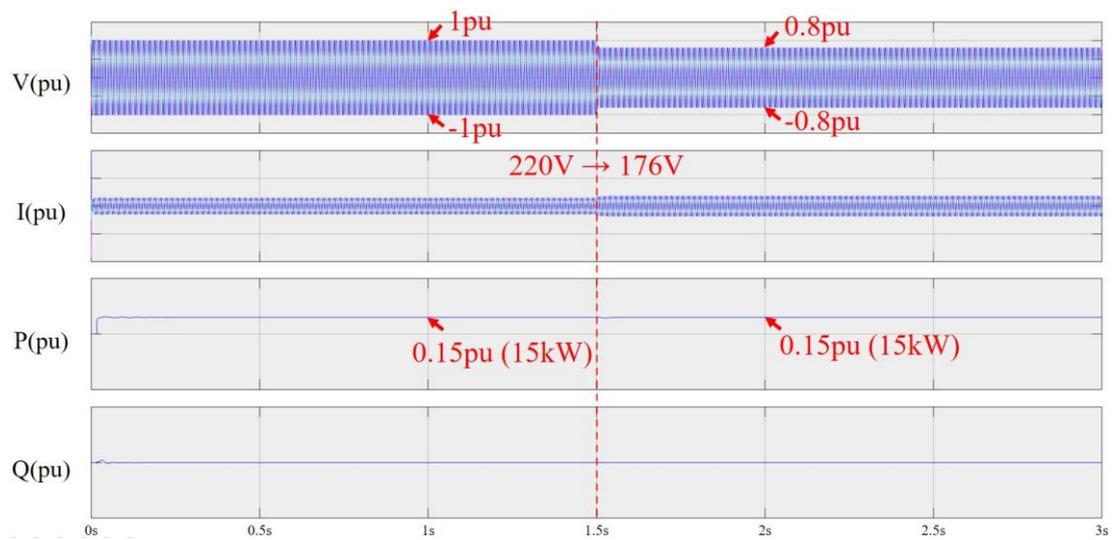


圖 5.12 儲能之電壓、電流、實功、虛功

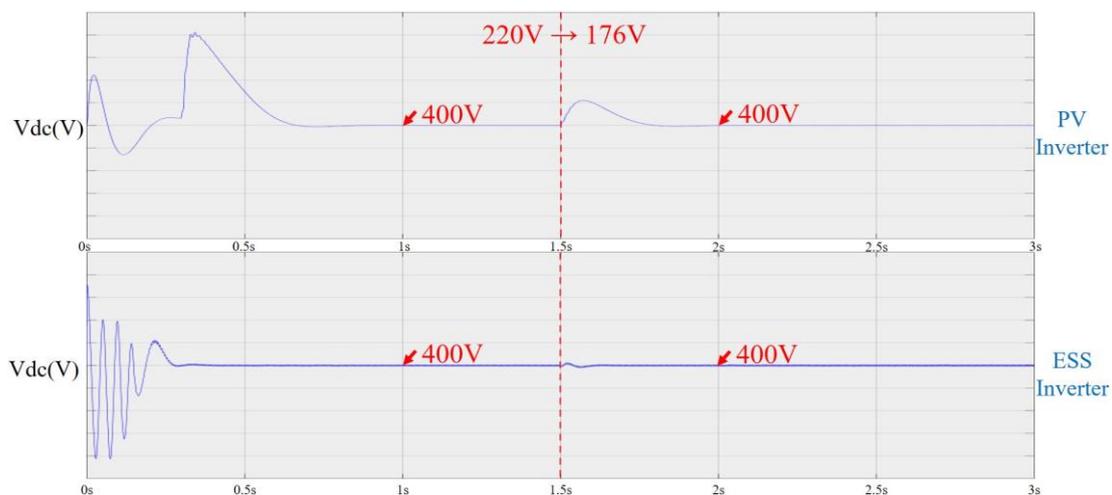


圖 5.13 PV 及儲能之直流鏈電壓



圖 5.14 市電之頻率

5.3 市電頻率上升至 61Hz

此節模擬架構如圖 5.15，兩系統於 AC 側併聯於市電，模擬併網時，儲能系統做 PQ 控制，太陽能系統做 MPPT 控制，市電頻率在 1.5s 超出併網頻率規範上升至 61Hz。

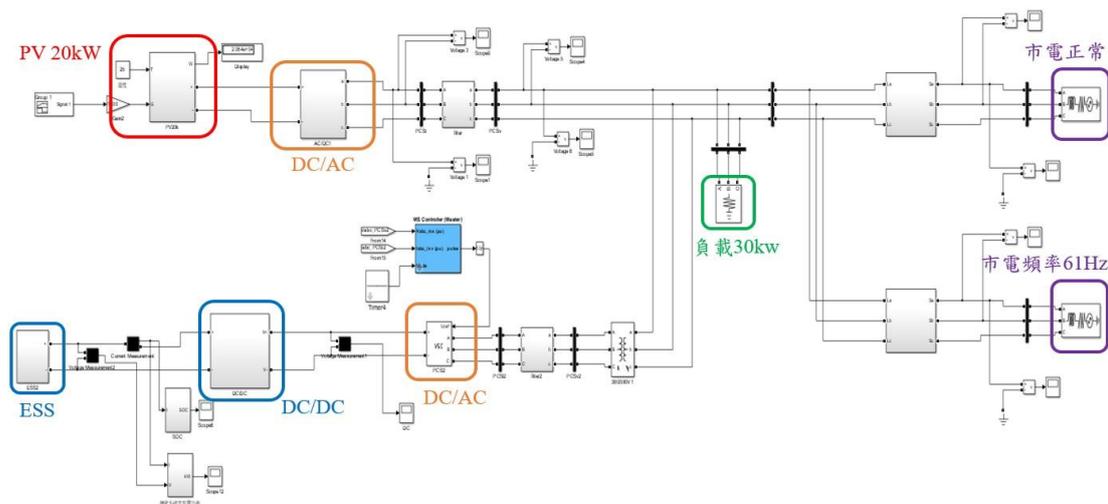


圖 5.15 微電網系統模型 (市電頻率上升至 61Hz)

當日日照充足($1000W/m^2$)時，PV 之 DC/DC 做 MPPT 追蹤，其輸出功率為 20kW，儲能之 DC/AC 做 PQ 控制，其輸出功率為 15kW，圖 5.16-圖 5.19 分別為當市電頻率上升至 61Hz 時，市電、負載、PV、儲能之電壓、電流、實功、虛功，圖 5.20 為當市電頻率上升至 61Hz 時，PV、儲能之直流鏈電壓，圖 5.21 為當市電頻率上升至 61Hz 時，市電之頻率。在 1.5s 時，市電頻率的上升導致 PV 與儲能有較大的功率波動，但 PV 及儲能系統的鎖相能力依舊能追隨市電頻率，並在短時間內恢復穩定；負載為 30kW 之純電阻性負載，在 1.5s 時，市電頻率上升至 61Hz 瞬間，將可能會導致功率瞬間波動嚴重而引起設備的損壞；此外，分散式電源提供給負載後，多餘之 5kW 仍會輸出至市電，如圖 5.16-圖 5.19 所示。PV 之 DC/AC 做直流鏈電壓控制 400V，儲能之 DC/DC 做直流鏈電壓控制 400V，在

1.5s 時，市電頻率的上升造成電壓的震盪，但依舊能回復至 400V，如圖 5.20 所示。如圖 5.21 所示，可以看到在 1.5s 時市電頻率的變化，從 60Hz 上升至 61Hz。

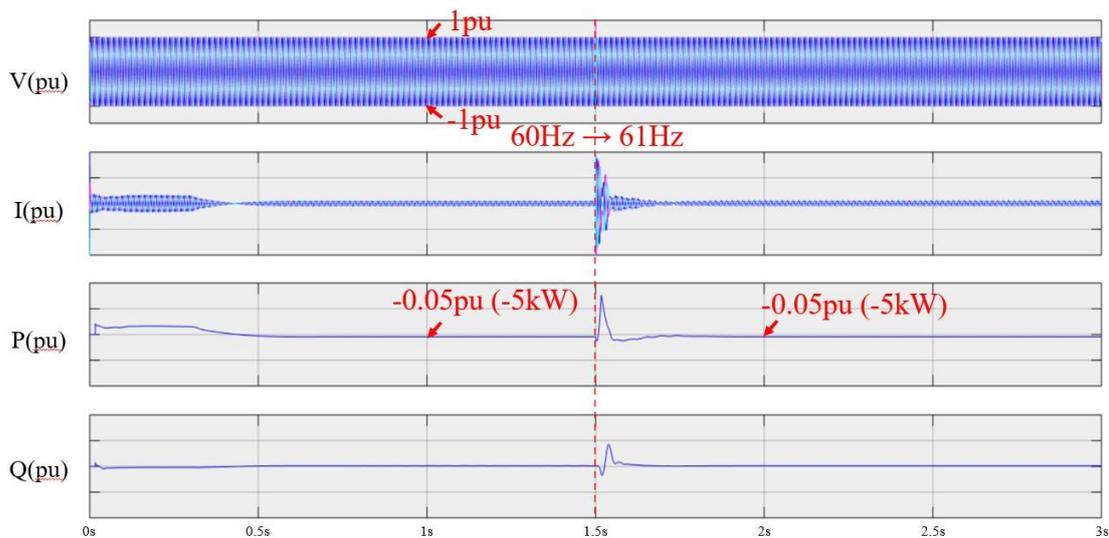


圖 5.16 市電之電壓、電流、實功、虛功

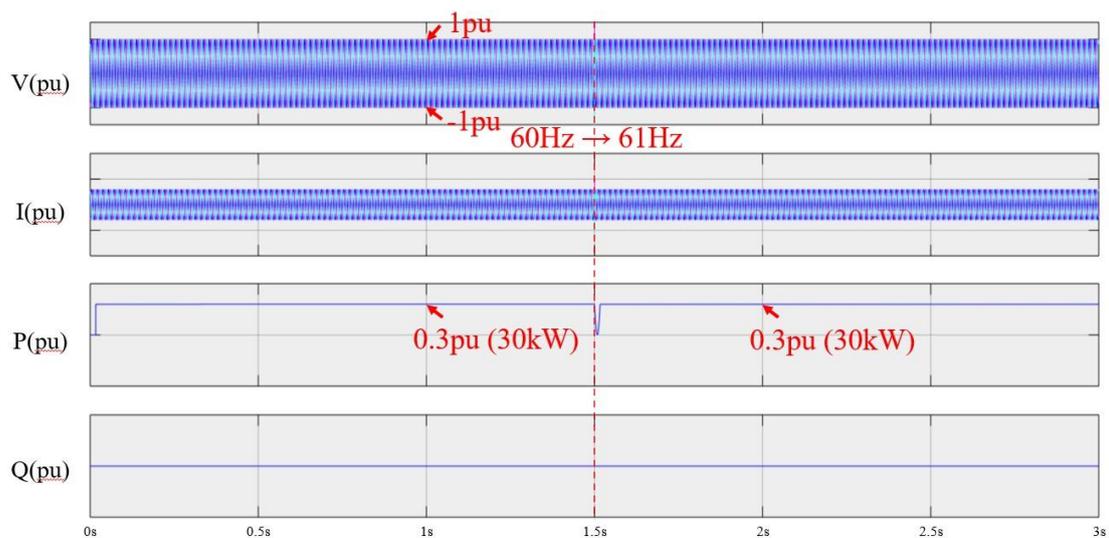


圖 5.17 負載之電壓、電流、實功、虛功

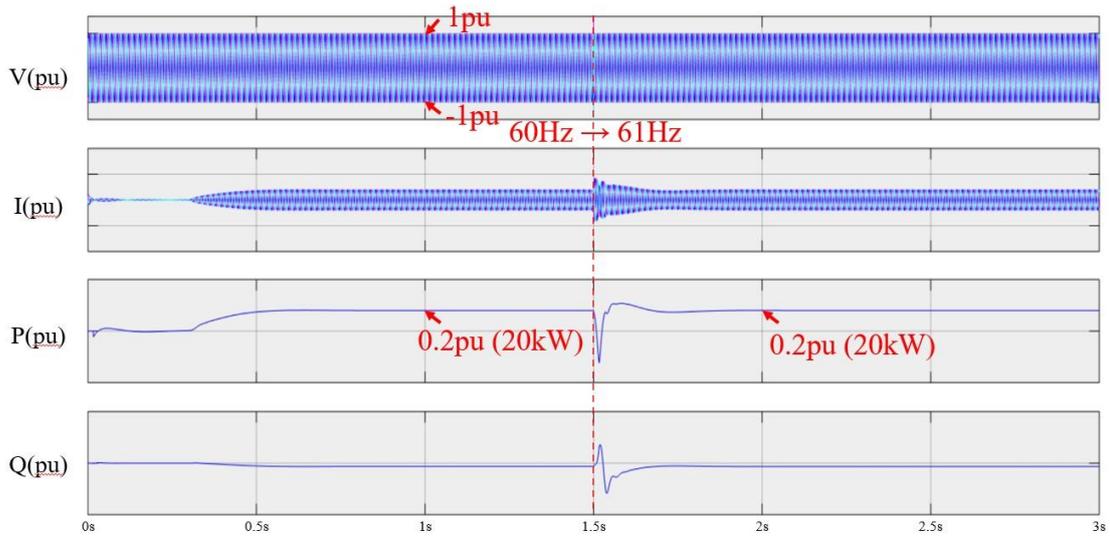


圖 5.18 PV 之電壓、電流、實功、虛功

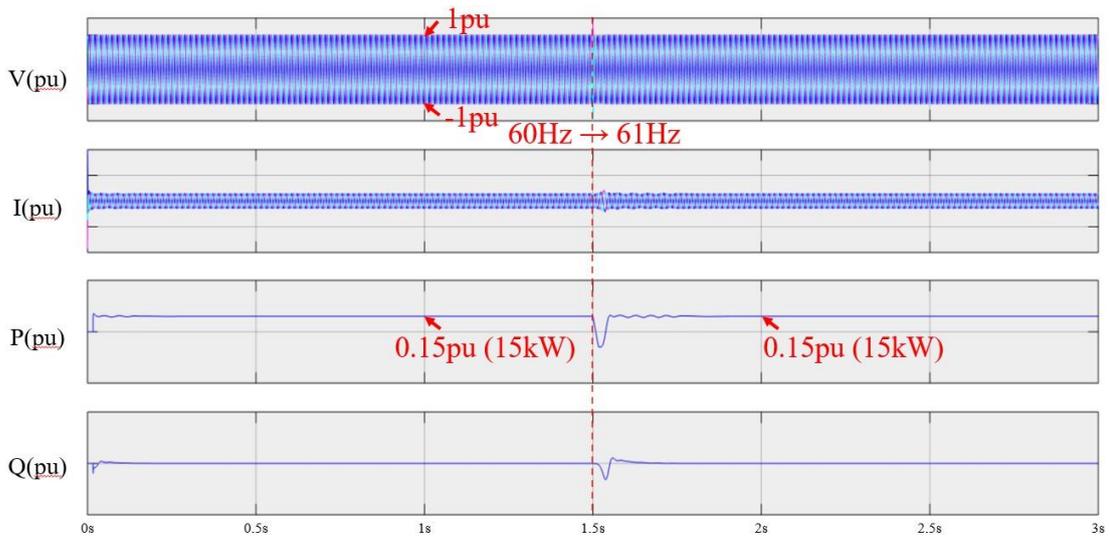


圖 5.19 儲能之電壓、電流、實功、虛功

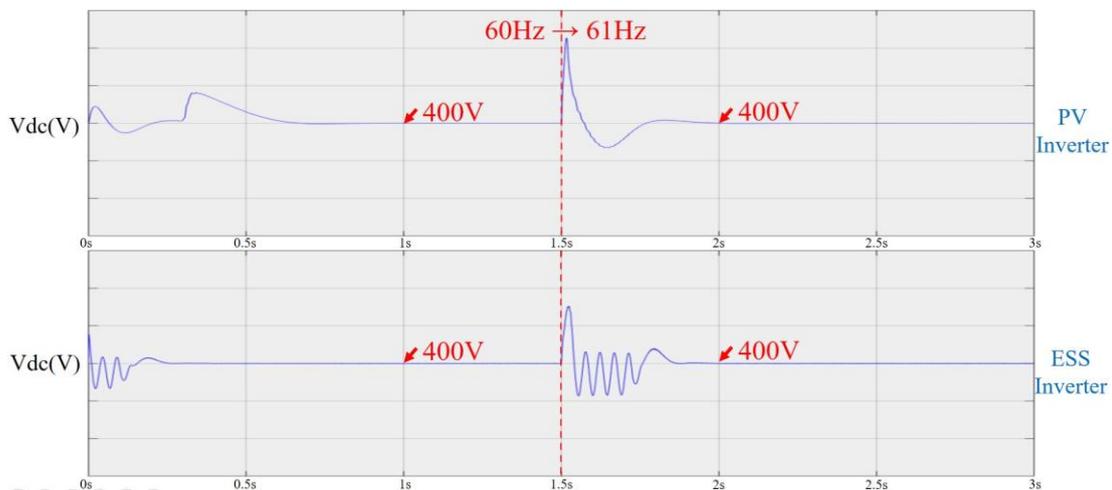


圖 5.20 PV 及儲能之直流鏈電壓

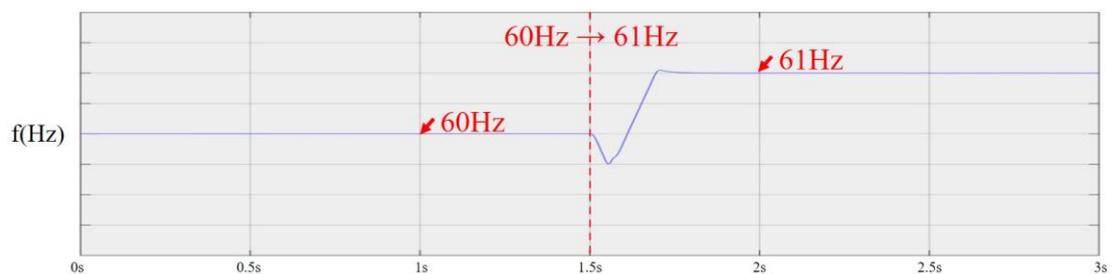


圖 5.21 市電之頻率

5.4 市電頻率下降至 59Hz

此節模擬架構如圖 5.22，兩系統於 AC 側併聯於市電，模擬併網時，儲能系統做 PQ 控制，太陽能系統做 MPPT 控制，市電頻率在 1.5s 超出併網頻率規範下降至 59Hz。

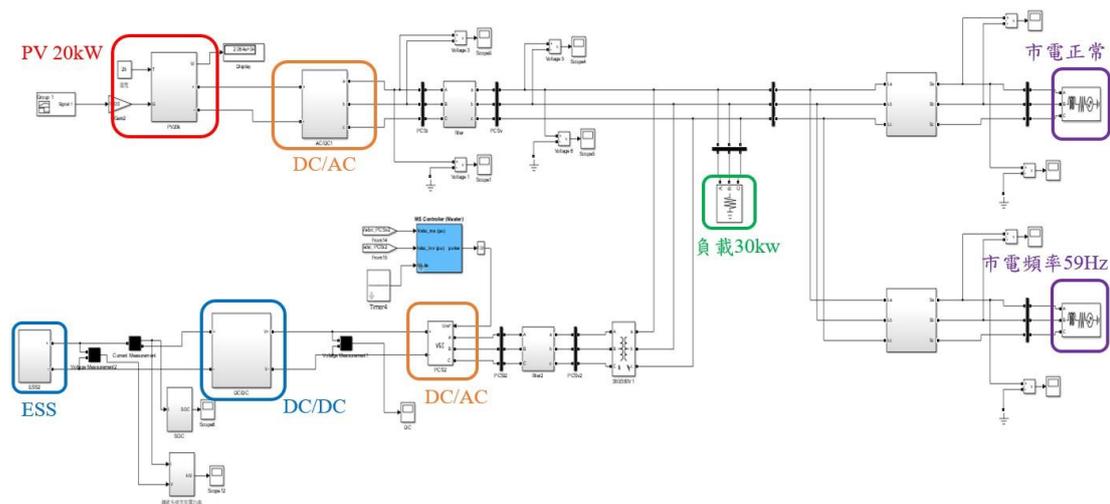


圖 5.22 微電網系統模型 (市電頻率下降至 59Hz)

當日日照充足($1000W/m^2$)時，PV 之 DC/DC 做 MPPT 追蹤，其輸出功率為 20kW，儲能之 DC/AC 做 PQ 控制，其輸出功率為 15kW，圖 5.23-圖 5.26 分別為當市電頻率下降至 59Hz 時，市電、負載、PV、儲能之電壓、電流、實功、虛功，圖 5.27 為當市電頻率下降至 59Hz 時，PV、儲能之直流鏈電壓，圖 5.28 為當市電頻率下降至 59Hz 時，市電之頻率。在 1.5s 時，市電頻率的下降導致 PV 與儲能有較大的功率波動，但 PV 及儲能系統的鎖相能力依舊能追隨市電頻率，並在短時間內恢復穩定；負載為 30kW 之純電阻性負載，在 1.5s 時，市電頻率的下降至 59Hz，可能會導致設備的損壞；此外，分散式電源提供給負載後，多餘之 5kW 仍會輸出至市電，如圖 5.23-圖 5.26 所示。PV 之 DC/AC 做直流鏈電壓控制 400V，儲能之 DC/DC 做直流鏈電壓控制 400V，在 1.5s 時，市電頻率的下降造成電壓的震

盪，但依舊能回復至 400V，如圖 5.27 所示。如圖 5.28 所示，可以看到在 1.5s 時市電頻率的變化，從 60Hz 下降至 59Hz。

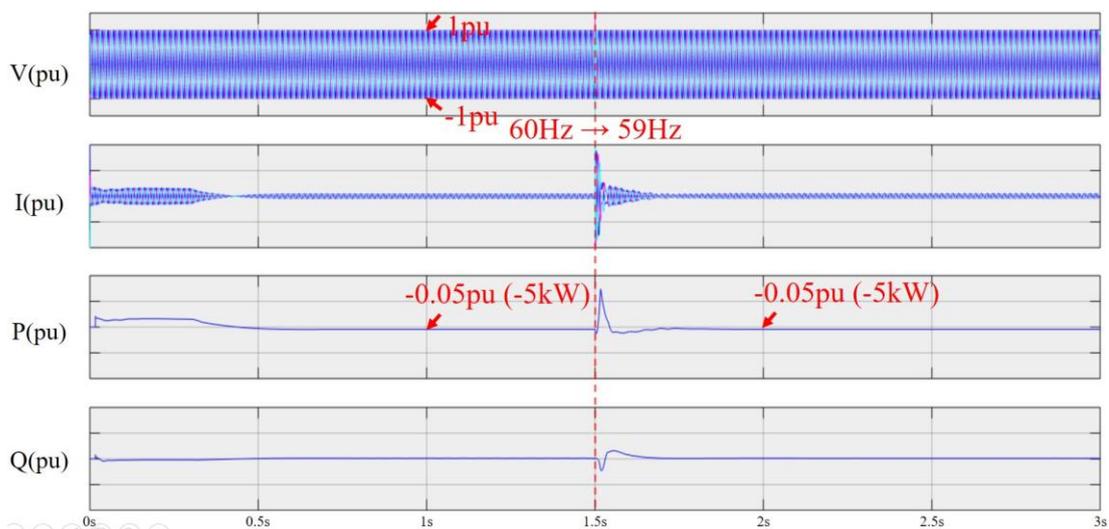


圖 5.23 市電之電壓、電流、實功、虛功

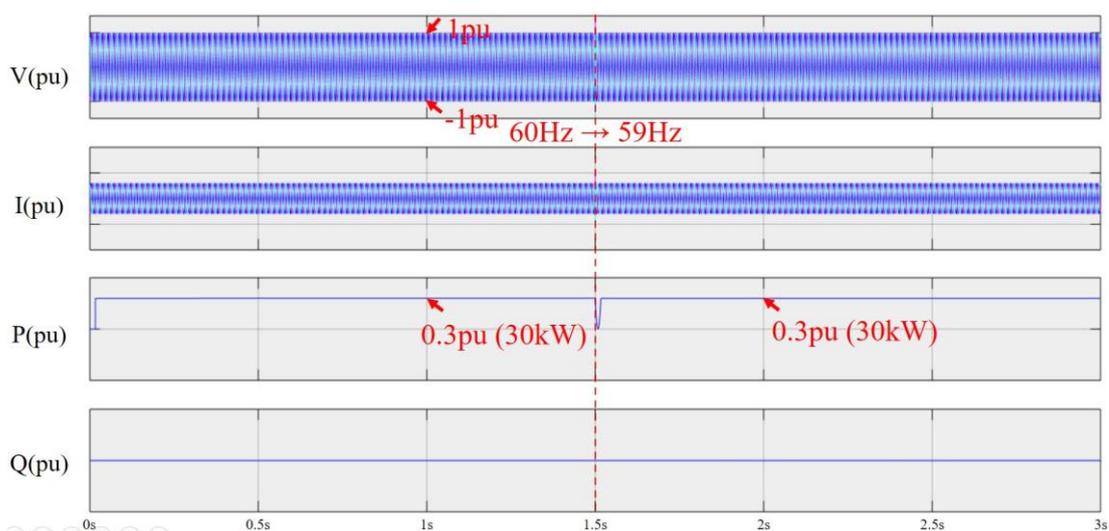


圖 5.24 負載之電壓、電流、實功、虛功

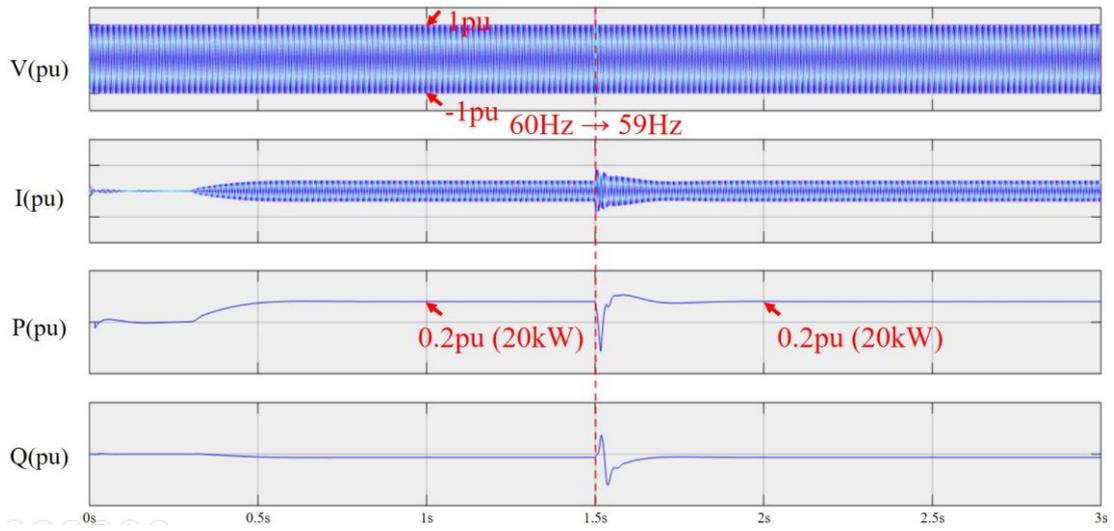


圖 5.25 PV 之電壓、電流、實功、虛功

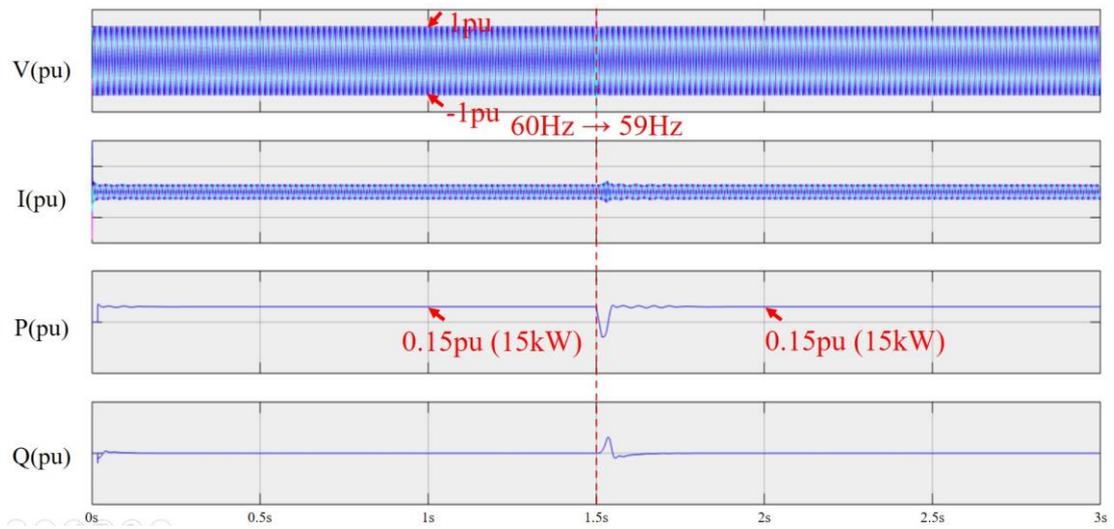


圖 5.26 儲能之電壓、電流、實功、虛功

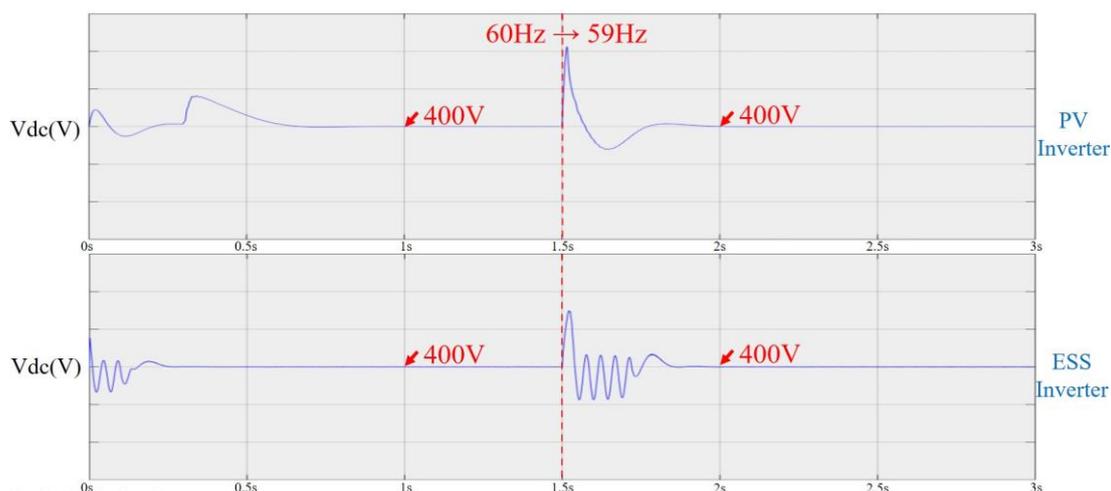


圖 5.27 PV 及儲能之直流鏈電壓

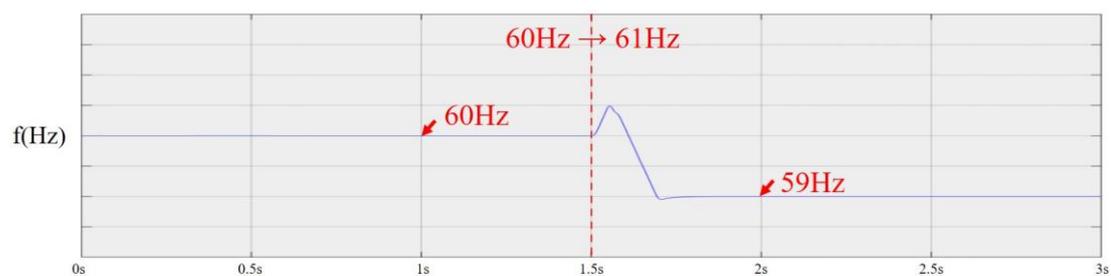


圖 5.28 市電之頻率

5.5 併網時，儲能 VF 控制市電電壓上升 20%

此節模擬架構如圖 5.29 所示，兩系統於 AC 側併聯於市電，模擬併網時，儲能系統改做 VF 控制，太陽能系統做 MPPT 控制，市電電壓在 1.5s 超出併網電壓規範上升 20%。

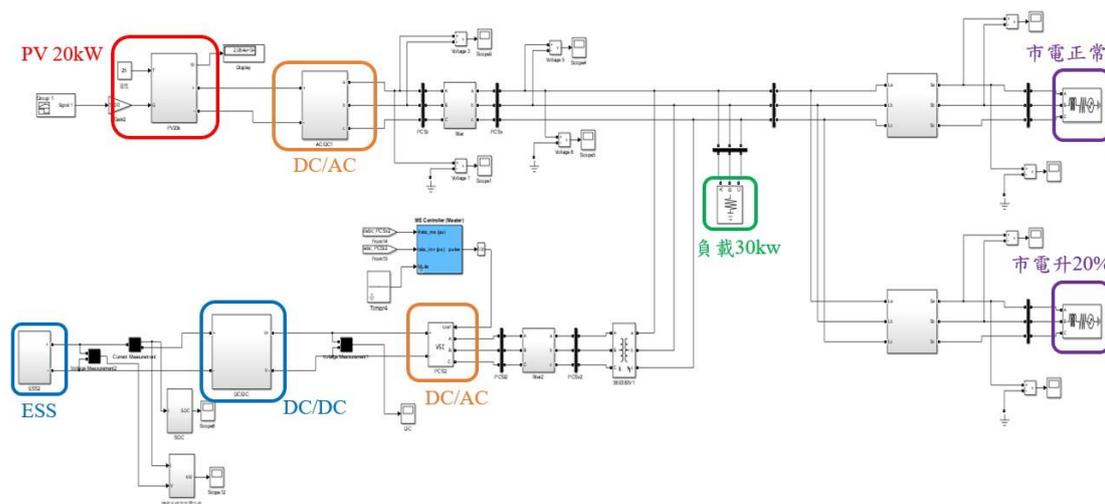


圖 5.29 微電網系統模型 (市電電壓上升 20%)

當日日照充足($1000W/m^2$)時，PV 之 DC/DC 做 MPPT 追蹤，其輸出功率為 20kW，圖 5.30-圖 5.33 分別為當市電電壓上升 20% 時，市電、負載、PV、儲能之電壓、電流、實功、虛功，圖 5.34 為當市電電壓上升 20% 時，PV、儲能之直流鏈電壓，圖 5.35 為當市電電壓上升 20% 時，市電之頻率。在 1.5s 時，市電電壓的上升導致 PV 有些微的功率波動，但在很短的時間內變恢復穩定，PV 為 MPPT 控制，電壓上升不影響其輸出功率；儲能之 DC/AC 改做 VF 控制，輸出線間電壓 220V、60Hz 的三相弦波，由於 1.5s 前市電電壓正常，儲能之電壓振幅誤差幾乎為零，內迴路之電流控制力為定值，但座標軸轉換之相位與市電電壓相位不同步，導致有虛功的產生，在 1.5s 時，市電電壓上升，儲能之電壓振幅開始有誤差，因市電容量遠大於儲能，導致儲能系統無法控制電壓振幅，其內迴路之電流控制力

將會發散，但由於儲能容量上限為 50kW，因此有設定容量上限保護，使功率趨於穩定；負載為 30kW 之純電阻性負載，在 1.5s 時，由於電壓上升使其所需功率變為 43kW，市電從吸收功率 5kW 變為提供功率 9kW，且受到儲能系統的影響，提供儲能虛功。PV 之 DC/AC 做直流鏈電壓控制 400V，儲能之 DC/DC 做直流鏈電壓控制 400V，在 1.5s 時，由於市電電壓上升，直流鏈電壓產生波動但隨後便恢復 400V，如圖 5.34 所示。在 1.5s 時，由於市電電壓上升，市電頻率受到影響產生震盪，如圖 5.35 所示。

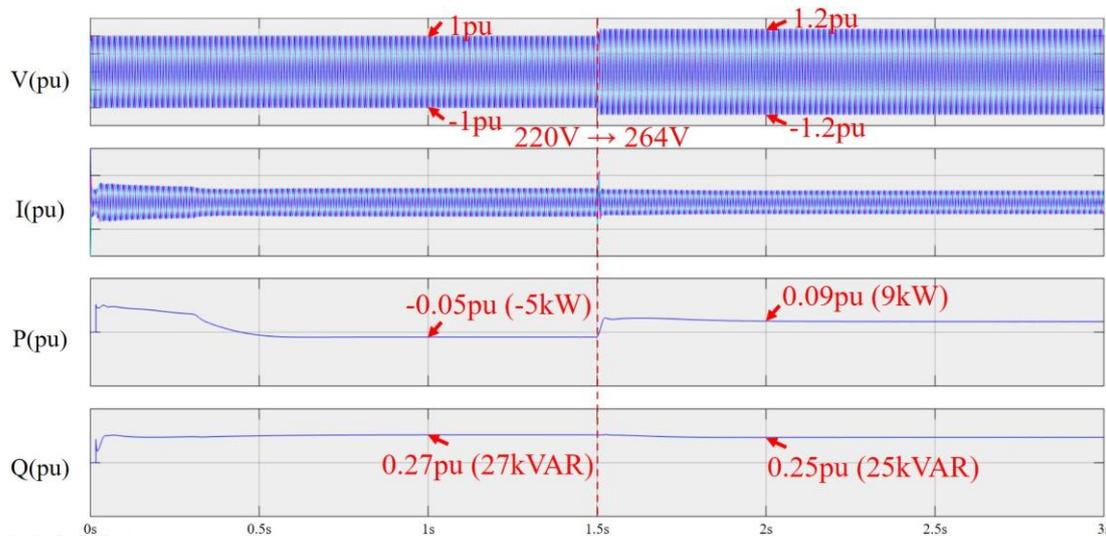


圖 5.30 市電之電壓、電流、實功、虛功

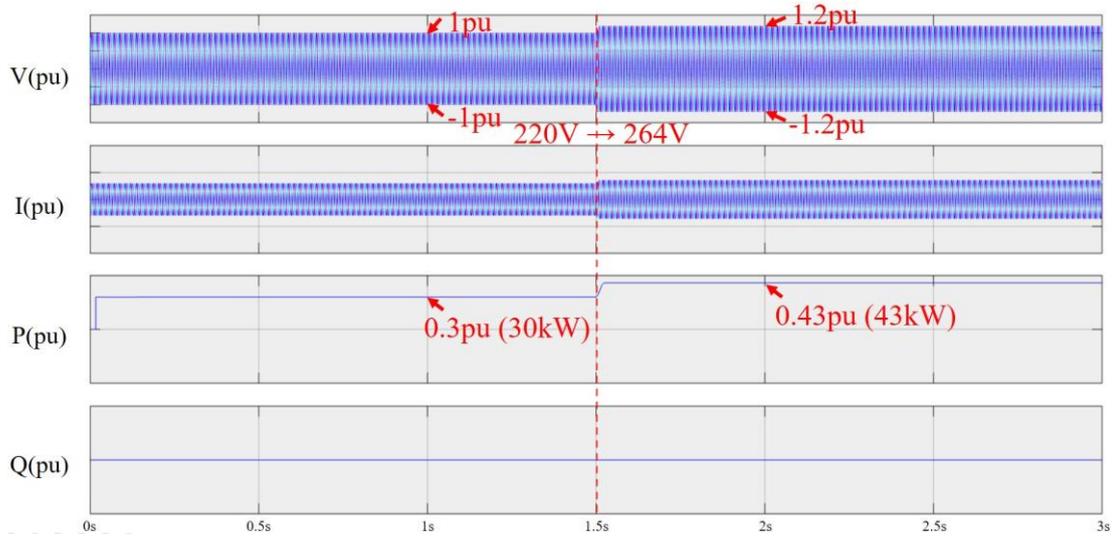


圖 5.31 負載之電壓、電流、實功、虛功

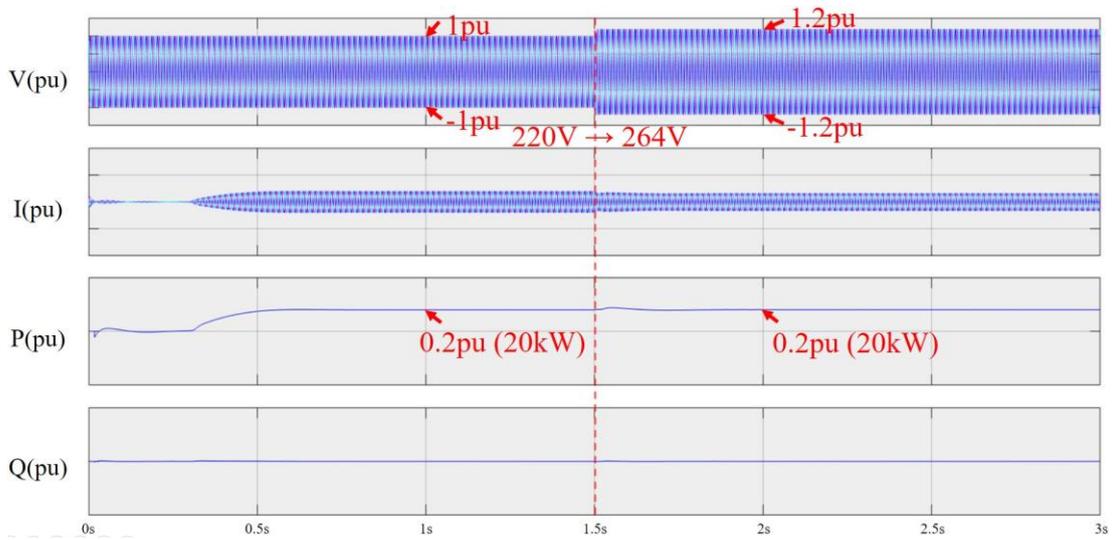


圖 5.32 PV 之電壓、電流、實功、虛功

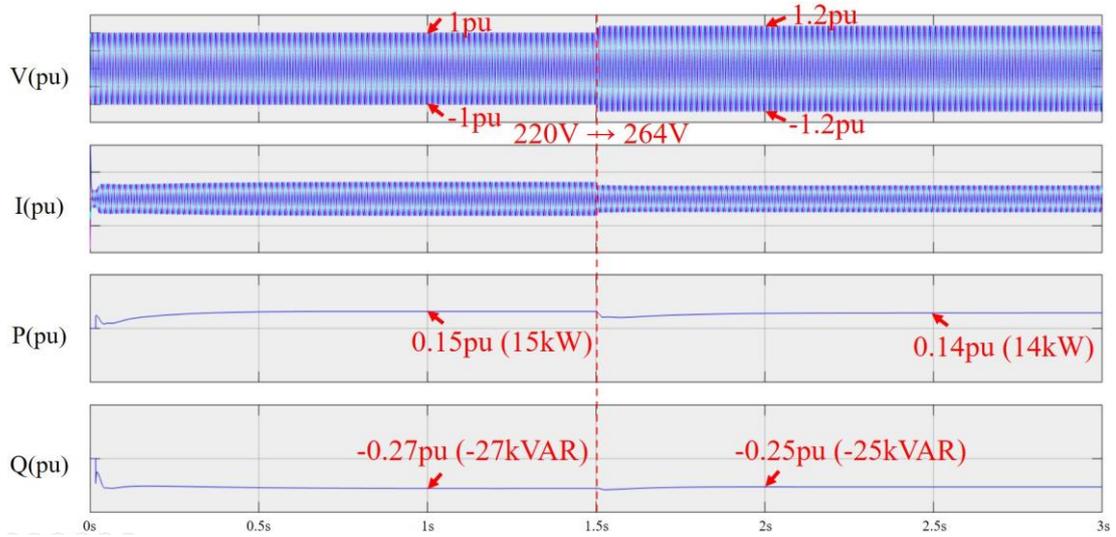


圖 5.33 儲能之電壓、電流、實功、虛功

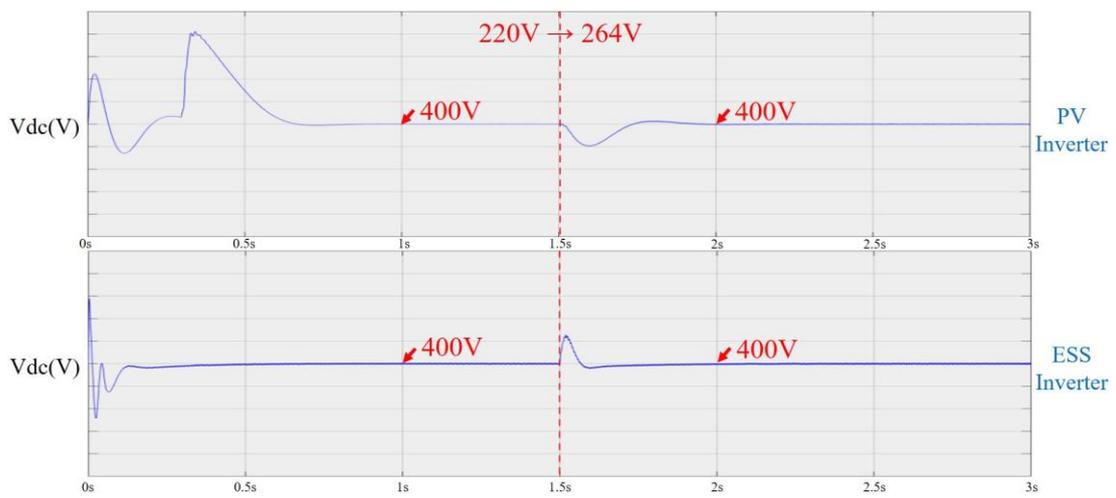


圖 5.34 PV 及儲能之直流鏈電壓



圖 5.35 市電之頻率

5.6 併網時，儲能 VF 控制市電電壓下降 20%

此節模擬架構如圖 5.36 所示，兩系統於 AC 側併聯於市電，模擬併網時，儲能系統改做 VF 控制，太陽能系統做 MPPT 控制，市電電壓在 1.5s 超出併網電壓規範下降 20%。

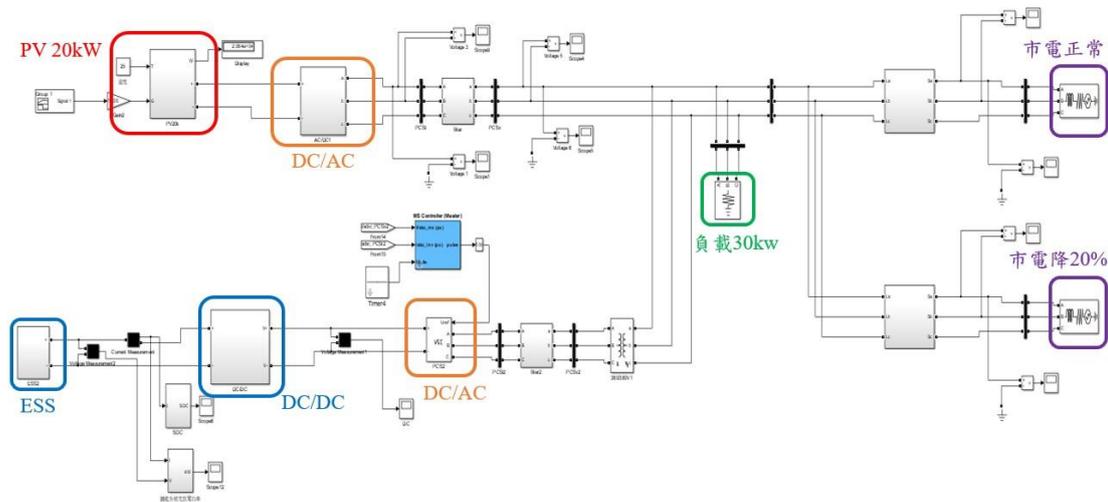


圖 5.36 微電網系統模型 (市電電壓下降 20%)

當日日照充足($1000W/m^2$)時，PV 之 DC/DC 做 MPPT 追蹤，其輸出功率為 20kW，圖 5.37-圖 5.40 分別為當市電電壓下降 20%時，市電、負載、PV、儲能之電壓、電流、實功、虛功，圖 5.41 為當市電電壓下降 20%時，PV、儲能之直流鏈電壓，圖 5.42 為當市電電壓下降 20%時，市電之頻率。在 1.5s 時，市電電壓的下降導致 PV 有些微的功率波動，但在很短的時間內變恢復穩定，PV 為 MPPT 控制，電壓下降不影響其輸出功率；儲能之 DC/AC 改做 VF 控制，輸

出線間電壓 220V、60Hz 的三相弦波，由於 1.5s 前市電電壓正常，儲能之電壓振幅誤差幾乎為零，內迴路之電流控制力為定值，但座標軸轉換之相位與市電電壓相位不同步，導致有虛功的產生，在 1.5s 時，市電電壓下降，儲能之電壓振幅開始有誤差，因市電容量遠大於儲能，導致儲能系統無法控制電壓振幅，其內迴路之電流控制力將會發散，但由於儲能容量上限為 50kW，因此有設定容量上限保護，使功率趨於穩定；負載為 30kW 之純電阻性負載，在 1.5s 時，由於電壓下降使其所需功率變為 19kW，市電從吸收功率 5kW 變為吸收功率 16kW，且受到儲能系統的影響，提供儲能虛功。PV 之 DC/AC 做直流鏈電壓控制 400V，儲能之 DC/DC 做直流鏈電壓控制 400V，在 1.5s 時，由於市電電壓下降，直流鏈電壓產生波動但隨後便恢復 400V，如圖 5.41 所示。在 1.5s 時，由於市電電壓下降，市電頻率受到影響產生震盪，如圖 5.42 所示。

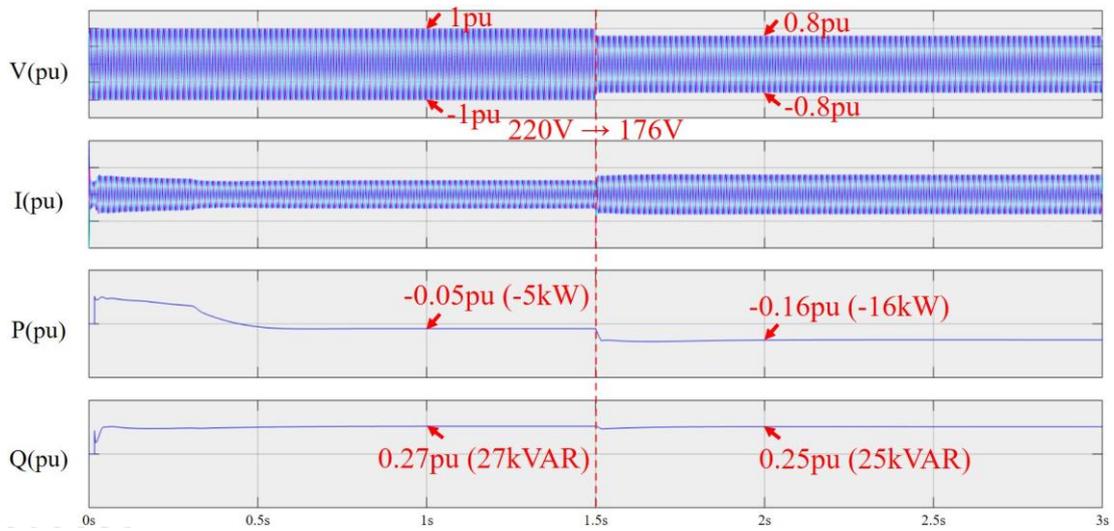


圖 5.37 市電之電壓、電流、實功、虛功

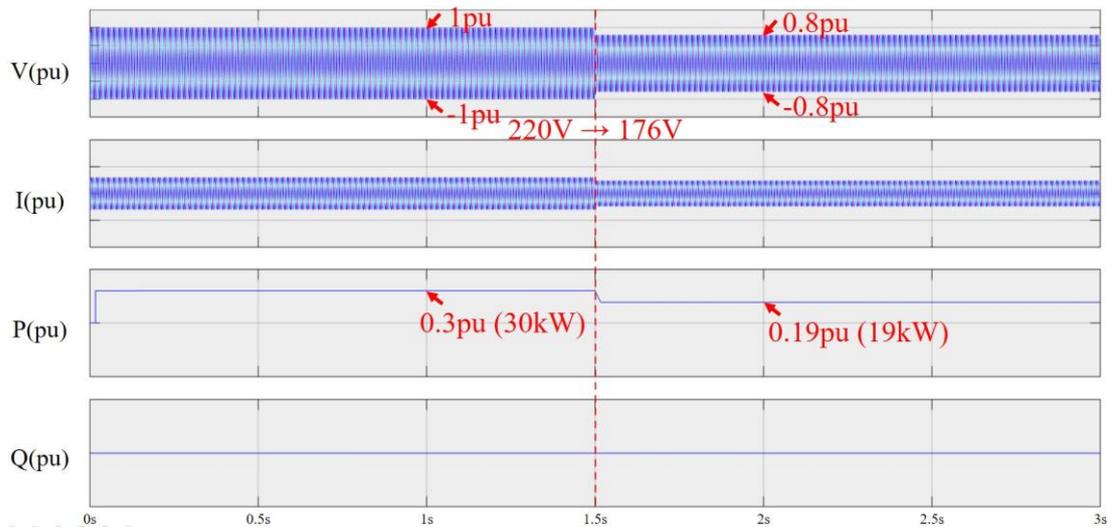


圖 5.38 負載之電壓、電流、實功、虛功

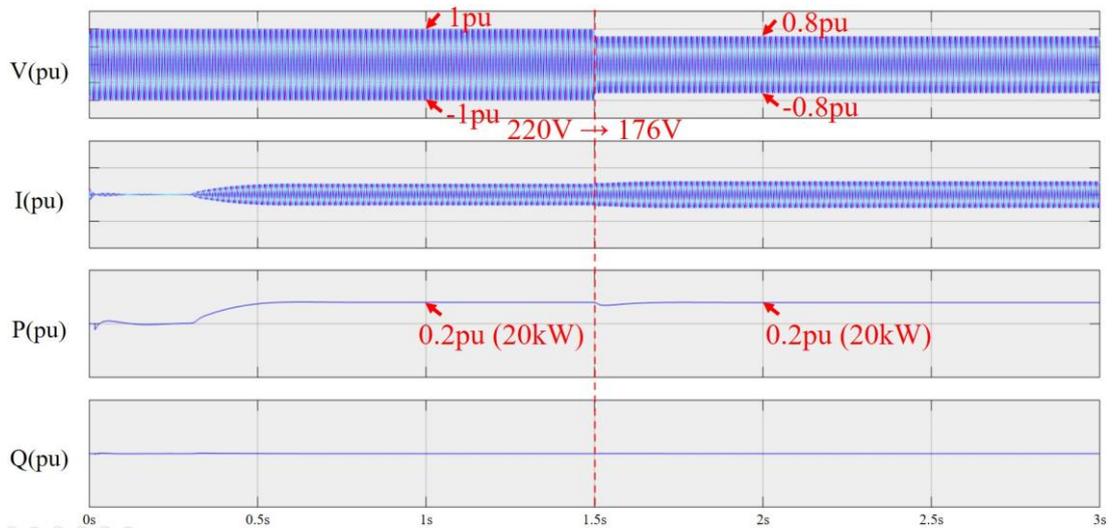


圖 5.39 PV 之電壓、電流、實功、虛功

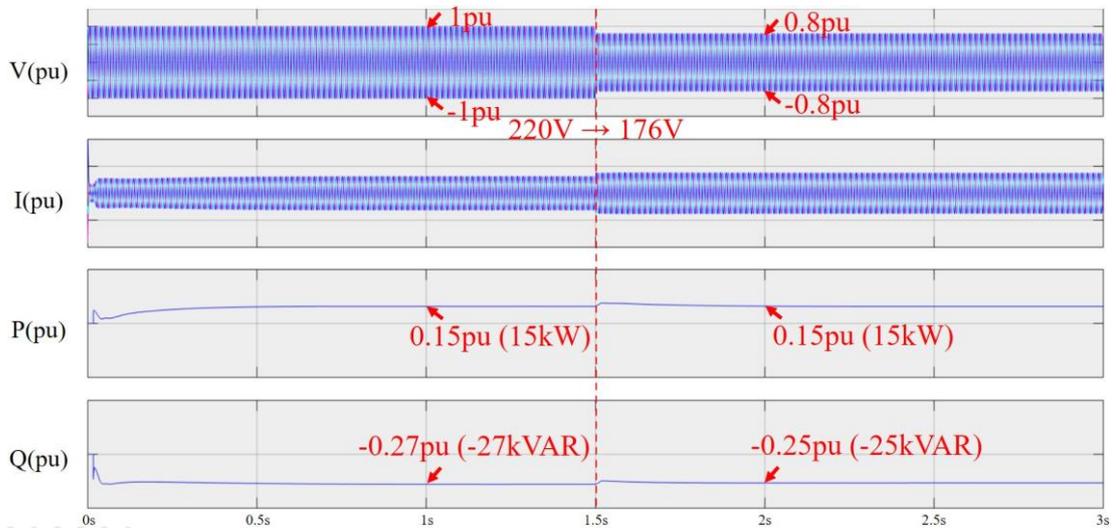


圖 5.40 儲能之電壓、電流、實功、虛功

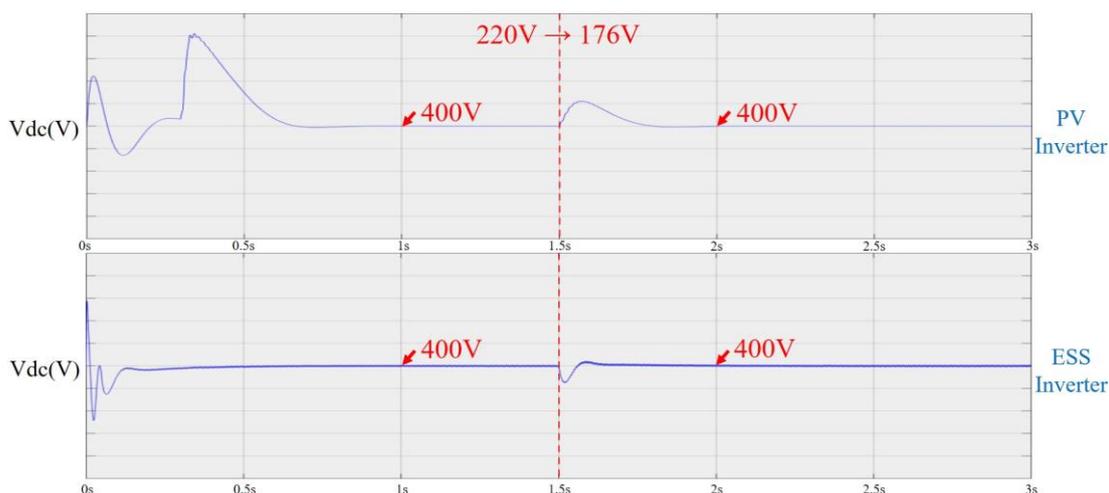


圖 5.41 PV 及儲能之直流鏈電壓



圖 5.42 市電之頻率

六、研究故障環境建立及測試與模型驗證

本章節依據核能所微電網系統建立之 Matlab/Simulink 故障環境，測試與驗證併網時在不同故障環境的市電單相、兩相對地故障時，觀察各分散式電源之實、虛功率與電壓、電流暫態之變化。

6.1 市電發生單相對地故障，故障程度 0.9

模擬架構如圖 6.1 所示，兩系統於 AC 側併聯於市電，模擬併網時，儲能系統做 PQ 控制，太陽能系統做 MPPT 控制，市電在 1s ~ 2s 發生單相對地故障，且故障程度為 0.9。

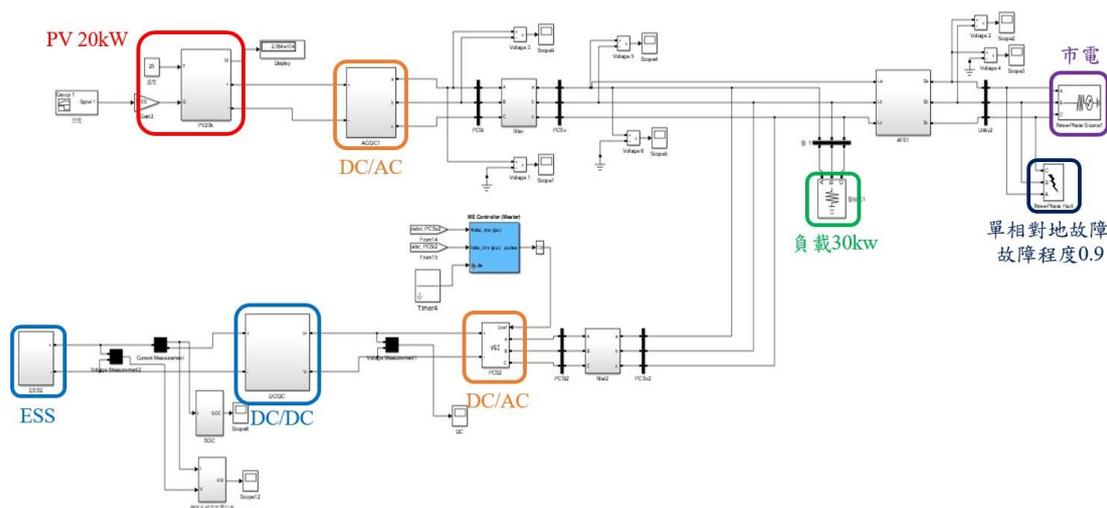


圖 6.1 微電網系統故障環境 (單相對地故障且故障程度 0.9)

當日日照充足($1000W/m^2$)時，PV 之 DC/DC 做 MPPT 追蹤，其輸出功率為 20kW，儲能之 DC/AC 做 PQ 控制，其輸出功率為 15kW，負載 30kW，圖 6.2-圖 6.5 別為當市電發生單相對地故障時，市電、負載、PV、儲能之電壓、電流、實功、虛功，圖 6.6 為當市電發生單相對地故障時，PV、儲能之直流鏈電壓，圖 6.7 為當市電發生單相對地故障時，市電之頻率。在 1s ~ 2s 單相對地故障期間，由於 PV 與儲能系統都是 MPPT 及定功率控制，其輸出功率在故障期間不變；負載為 30kW 之純電阻性負載，在 1s ~ 2s 單相對地故障期

間，其所需功率變為 28kW，市電從吸收功率 5kW 變為吸收功率 7kW，如圖 6.2-圖 6.5 所示。PV 之 DC/AC 做直流鏈電壓控制 400V，儲能之 DC/DC 做直流鏈電壓控制 400V，在 1s ~ 2s 單相對地故障期間，直流鏈電壓產生些微波動，如圖 6.6 所示。在 1s 發生故障與 2s 排除故障時，市電頻率產生震盪，如圖 6.7 所示。

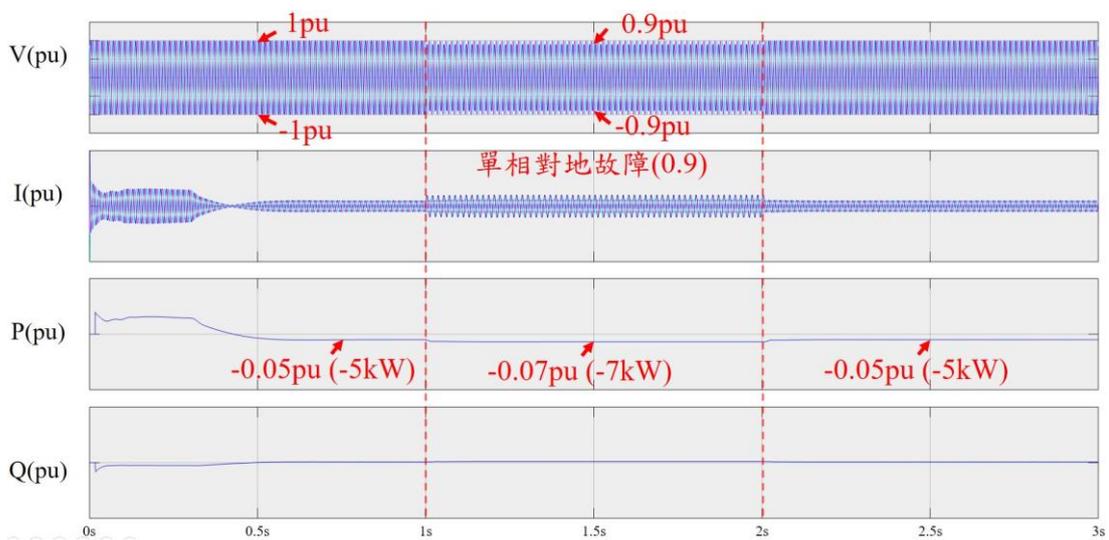


圖 6.2 市電之電壓、電流、實功、虛功

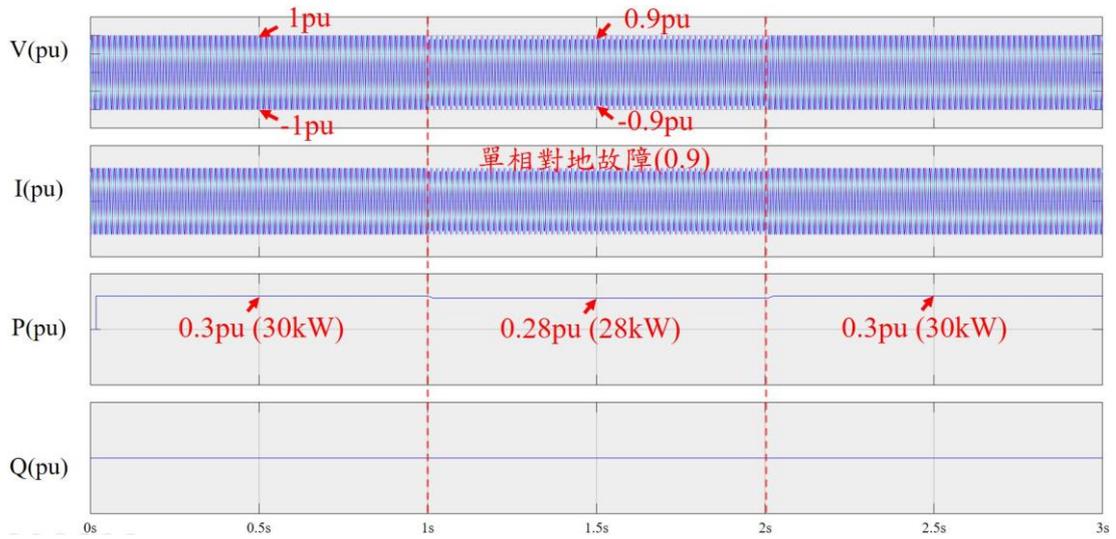


圖 6.4 負載之電壓、電流、實功、虛功

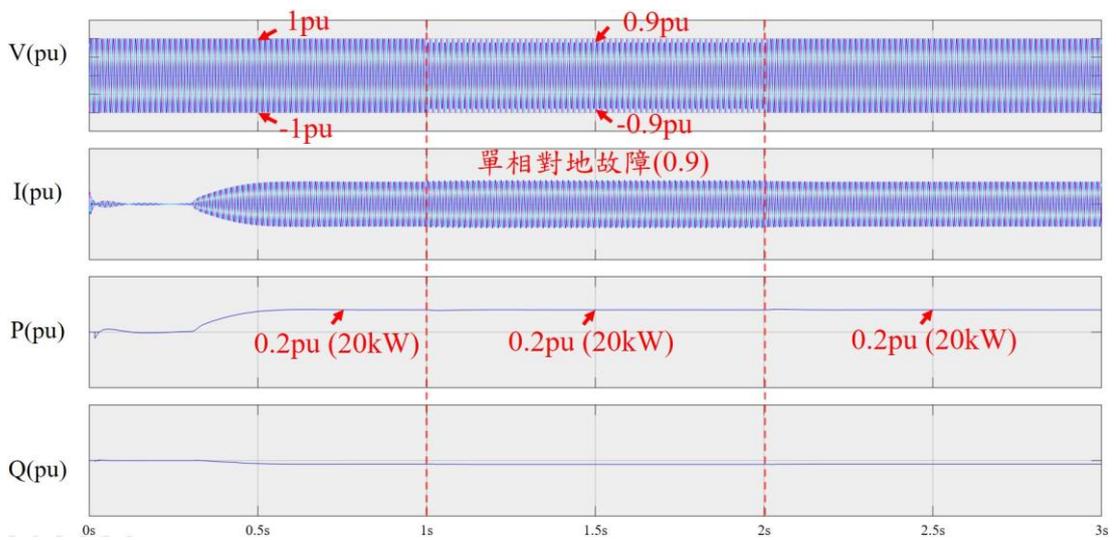


圖 6.4 PV 之電壓、電流、實功、虛功

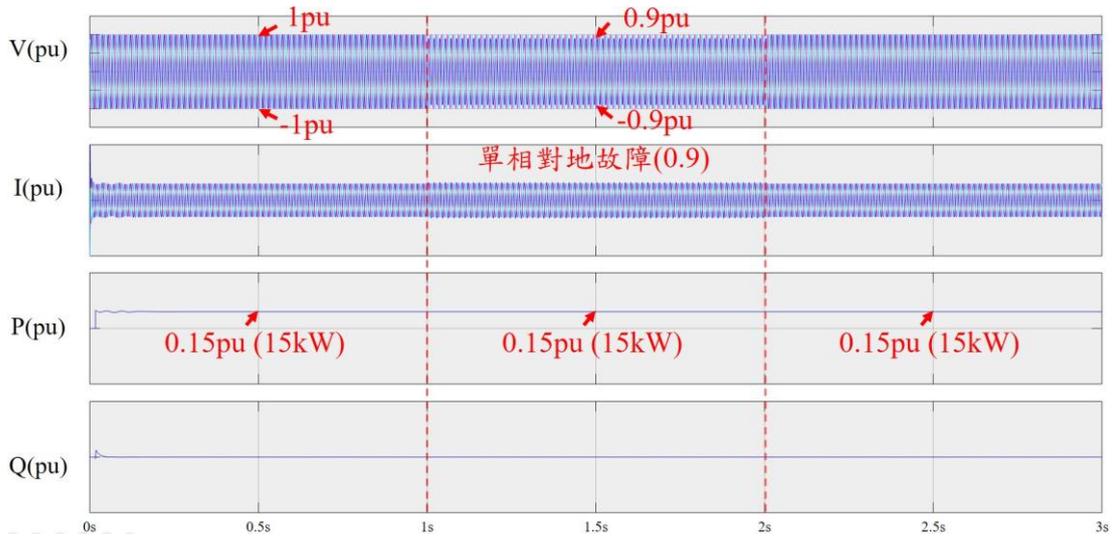


圖 6.5 儲能之電壓、電流、實功、虛功

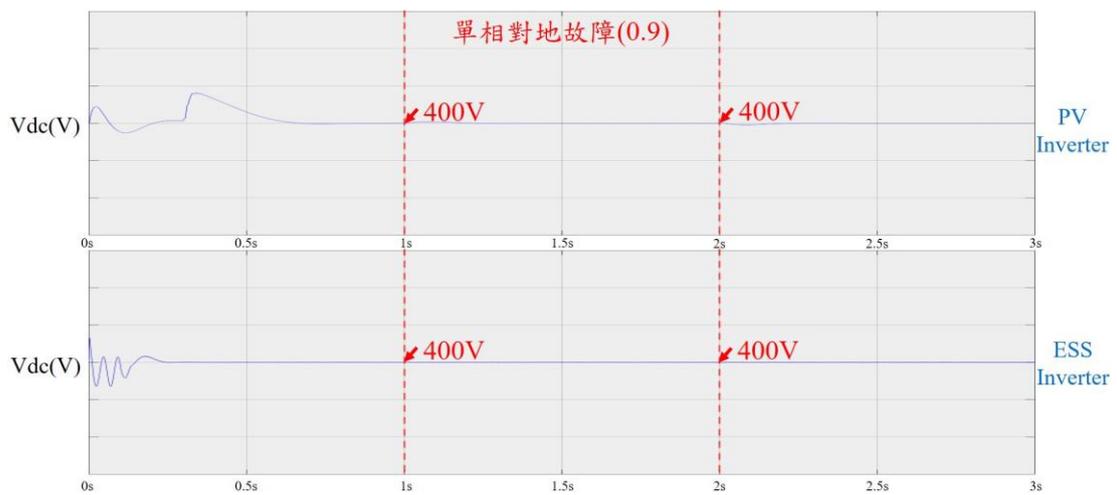


圖 6.6 PV 及儲能之直流鏈電壓

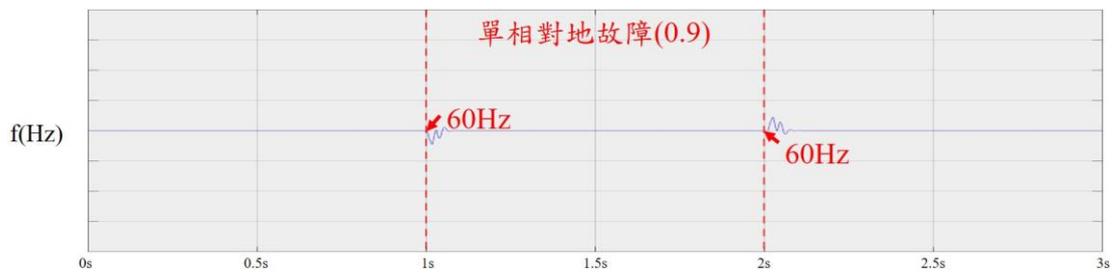


圖 6.7 市電之頻率

6.2 市電發生兩相對地故障，故障程度 0.9

此節模擬架構如圖 6.8 所示，兩系統於 AC 側併聯於市電，模擬併網時，儲能系統做 PQ 控制，太陽能系統做 MPPT 控制，市電在 1s ~ 2s 發生兩相對地故障，且故障程度為 0.9。

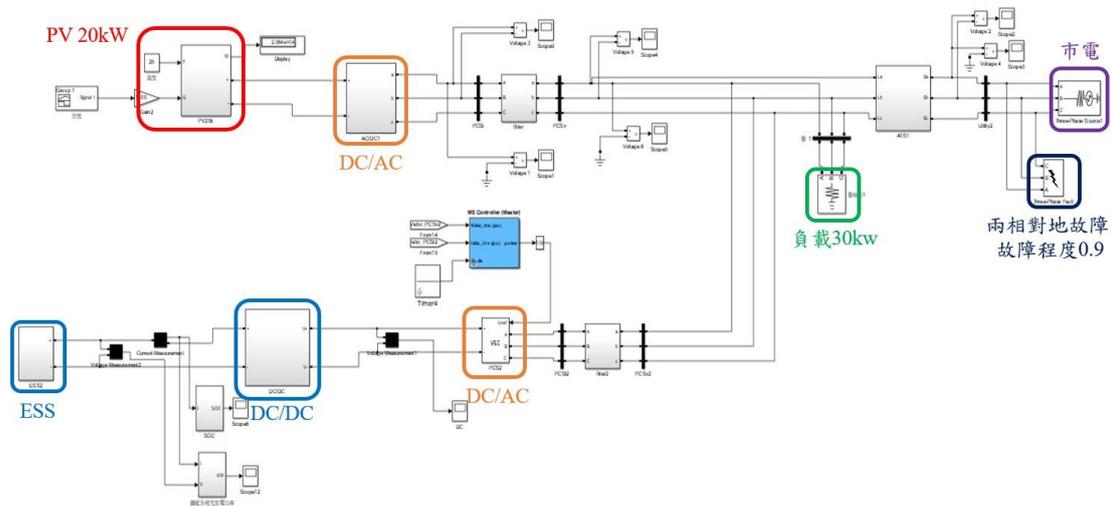


圖 6.8 微電網系統故障環境 (兩相對地故障且故障程度 0.9)

當日日照充足($1000W/m^2$)時，PV 之 DC/DC 做 MPPT 追蹤，其輸出功率為 20kW，儲能之 DC/AC 做 PQ 控制，其輸出功率為 15kW，負載為 30kW，圖 6.9-圖 6.12 分別為當市電發生兩相對地故障時，市電、負載、PV、儲能之電壓、電流、實功、虛功，圖 6.13 為當市電發生兩相對地故障時，PV、儲能之直流鏈電壓，圖 6.14 為當市電發生兩相對地故障時，市電之頻率。在 1s ~ 2s 兩相對地故障期間，由於 PV 與儲能系統都是 MPPT 及定功率控制，其輸出功率

在故障期間不變；負載為 30kW 之純電阻性負載，在 1s ~ 2s 兩相對地故障期間，其所需功率變為 26kW，市電從吸收功率 5kW 變為吸收功率 9kW，如圖 6.9-圖 6.12 所示。PV 之 DC/AC 做直流鏈電壓控制 400V，儲能之 DC/DC 做直流鏈電壓控制 400V，在 1s ~ 2s 兩相對地故障期間，直流鏈電壓產生些微波動，如圖 6.13 所示。在 1s 發生故障與 2s 排除故障時，市電頻率產生震盪，如圖 6.14 所示。

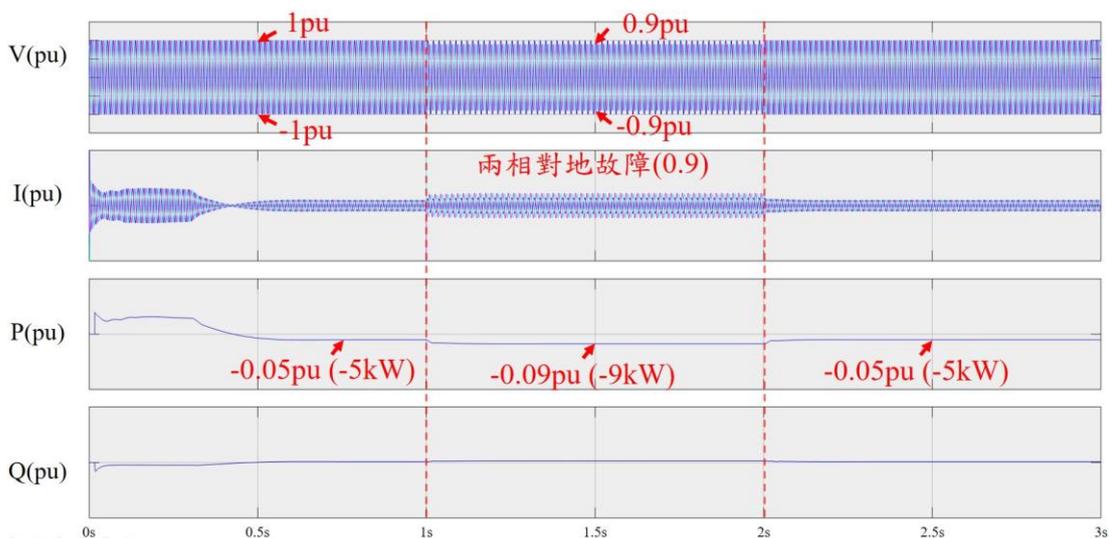


圖 6.9 市電之電壓、電流、實功、虛功

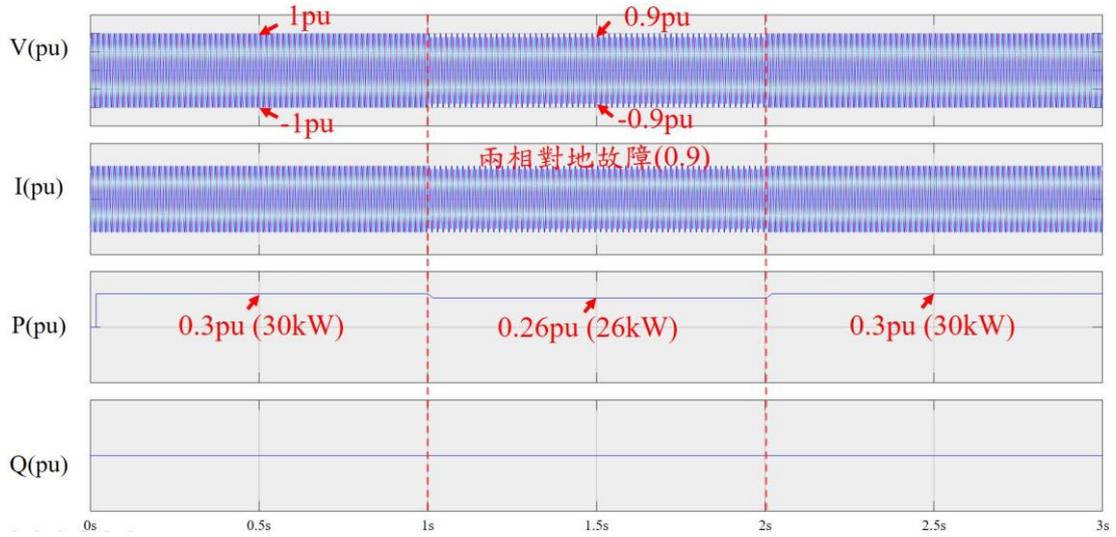


圖 6.10 負載之電壓、電流、實功、虛功

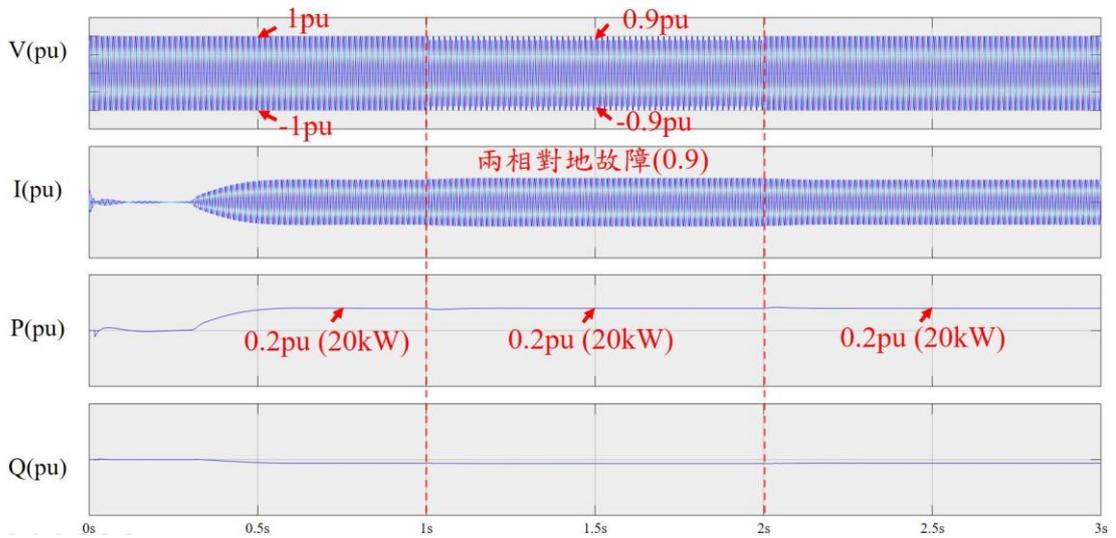


圖 6.11 PV 之電壓、電流、實功、虛功

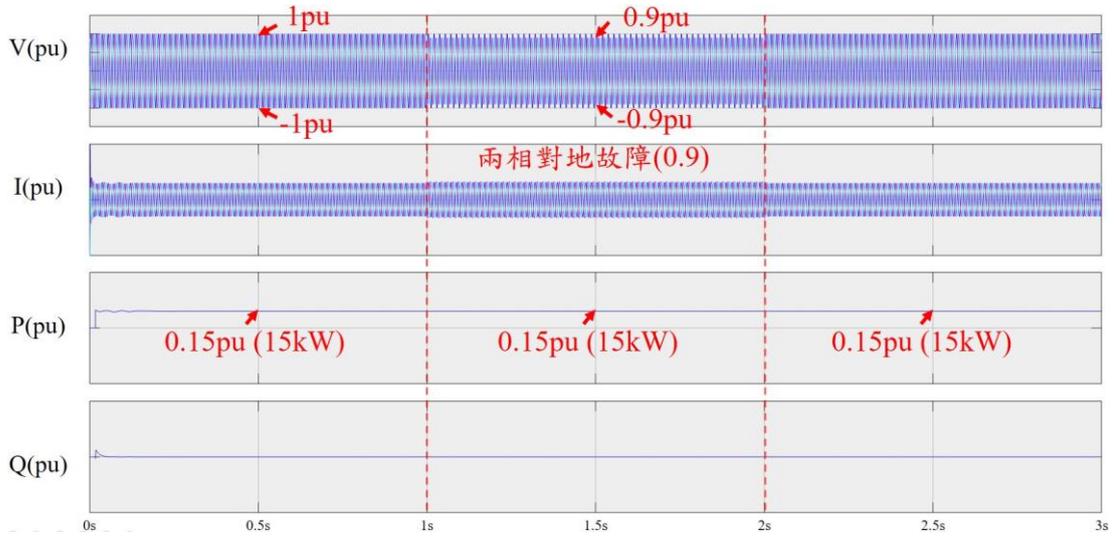


圖 6.12 儲能之電壓、電流、實功、虛功

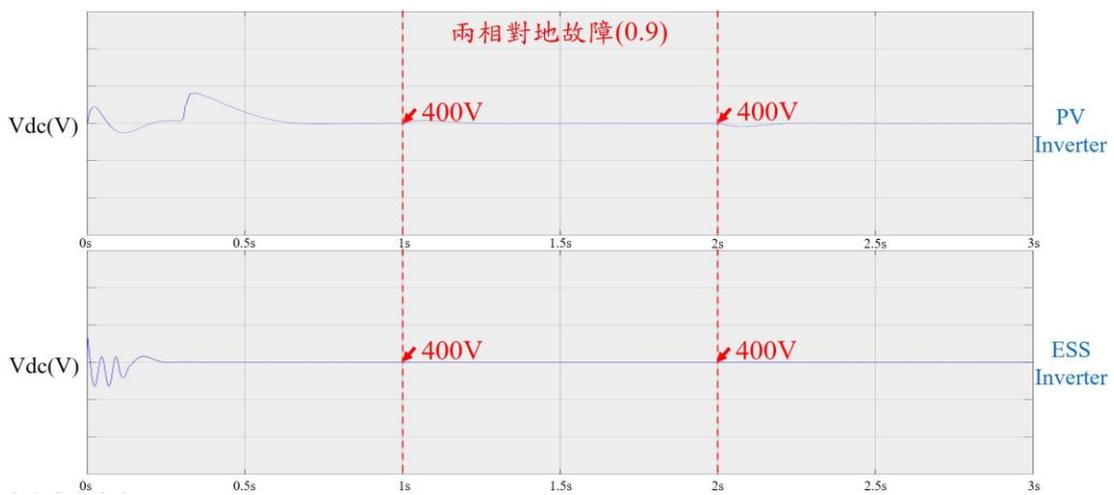


圖 6.13 PV 及儲能之直流鏈電壓

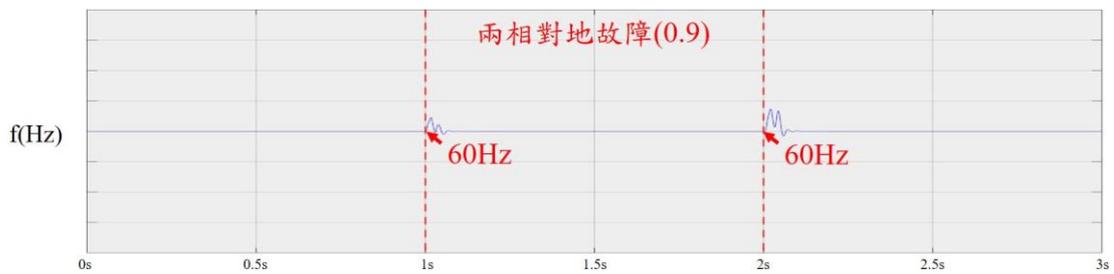


圖 6.14 市電之頻率

6.3 市電發生單相對地故障，故障程度 0.6

模擬架構如圖 6.15 所示，兩系統於 AC 側併聯於市電，模擬併網時，儲能系統做 PQ 控制，太陽能系統做 MPPT 控制，市電在 1s ~ 2s 發生單相對地故障，且故障程度為 0.6。

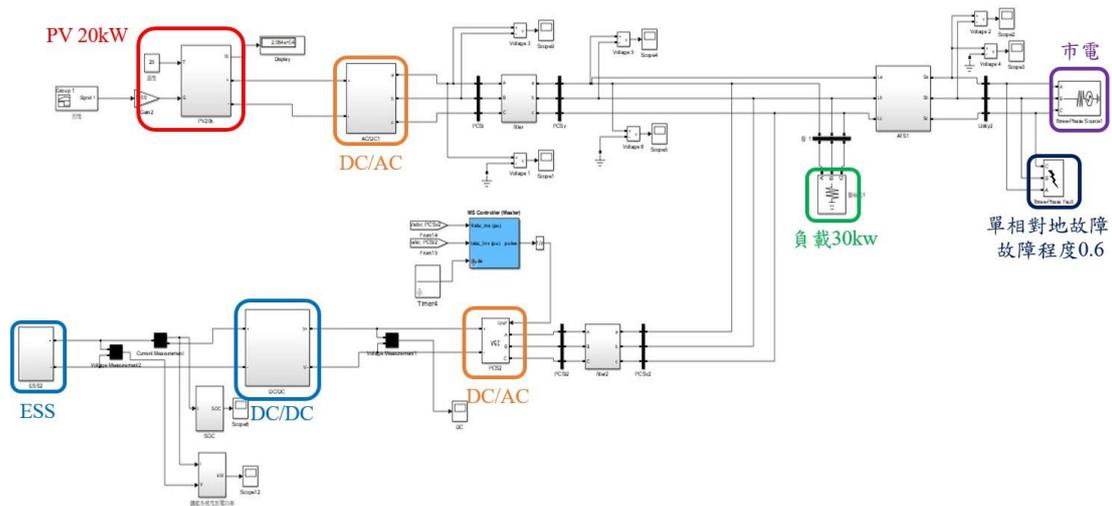


圖 6.15 微電網系統故障環境 (單相對地故障且故障程度 0.6)

當日日照充足($1000W/m^2$)時，PV 之 DC/DC 做 MPPT 追蹤，其輸出功率為 20kW，儲能之 DC/AC 做 PQ 控制，其輸出功率為 15kW，負載為 30kW，圖 6.16-圖 6.19 分別為當市電發生單相對地故障 0.6 時，市電、負載、PV、儲能之電壓、電流、實功、虛功，圖 6.20 為當市電發生單相對地故障 0.6 時，PV、儲能之直流鏈電壓，圖 6.21 為當市電發生單相對地故障時，市電之頻率。在 1s ~ 2s 單相對地故障期間，由於 PV 與儲能系統都是 MPPT 及定功率控制，A

相電壓大幅下降，導致 A 相電流明顯的上升，其輸出功率在故障期間不變；負載為 30kW 之純電阻性負載，在 1s ~ 2s 單相對地故障期間，由於 A 相電壓大幅下降，使 A 相電流隨之下降，其所需功率變為 23kW，市電從吸收功率 5kW 變為吸收功率 12kW。PV 之 DC/AC 做直流鏈電壓控制 400V，儲能之 DC/DC 做直流鏈電壓控制 400V，在 1s ~ 2s 單相對地故障期間，直流鏈電壓產生波動，如圖 6.20 所示。在 1s 發生故障與 2s 排除故障時，市電頻率產生震盪，如圖 6.21 所示。

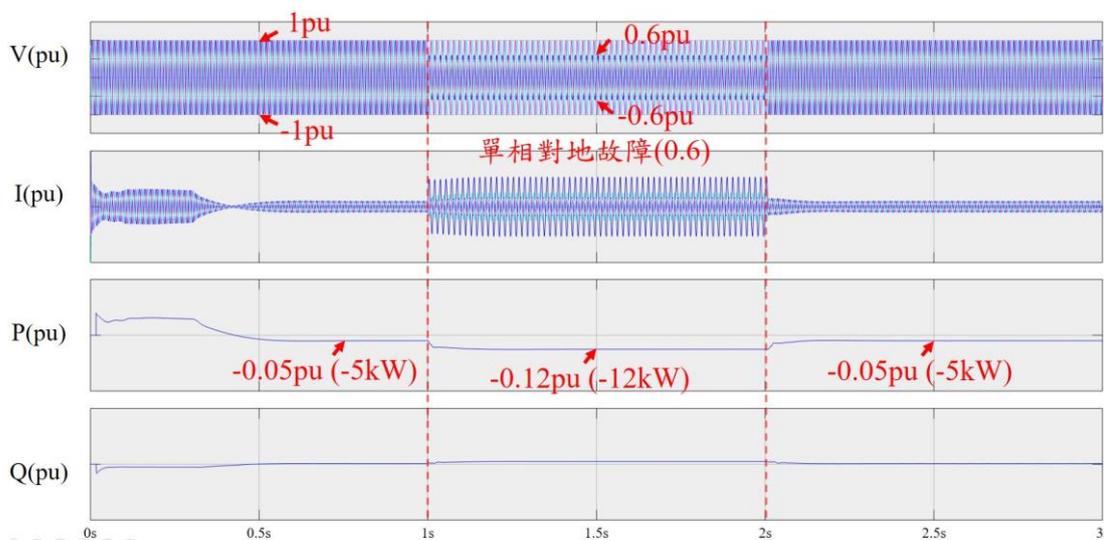


圖 6.16 市電之電壓、電流、實功、虛功

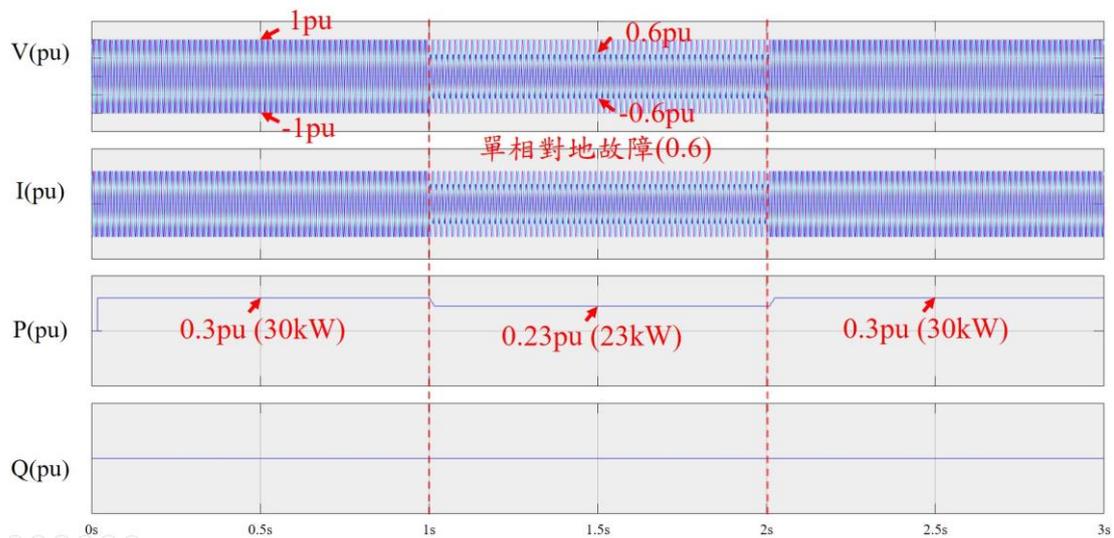


圖 6.17 負載之電壓、電流、實功、虛功

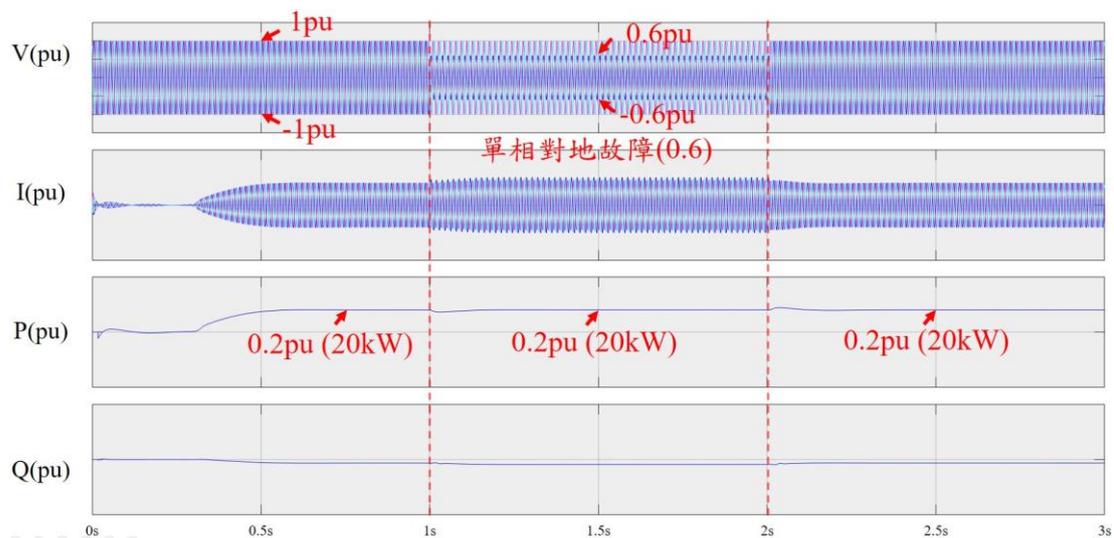


圖 6.18 PV 之電壓、電流、實功、虛功

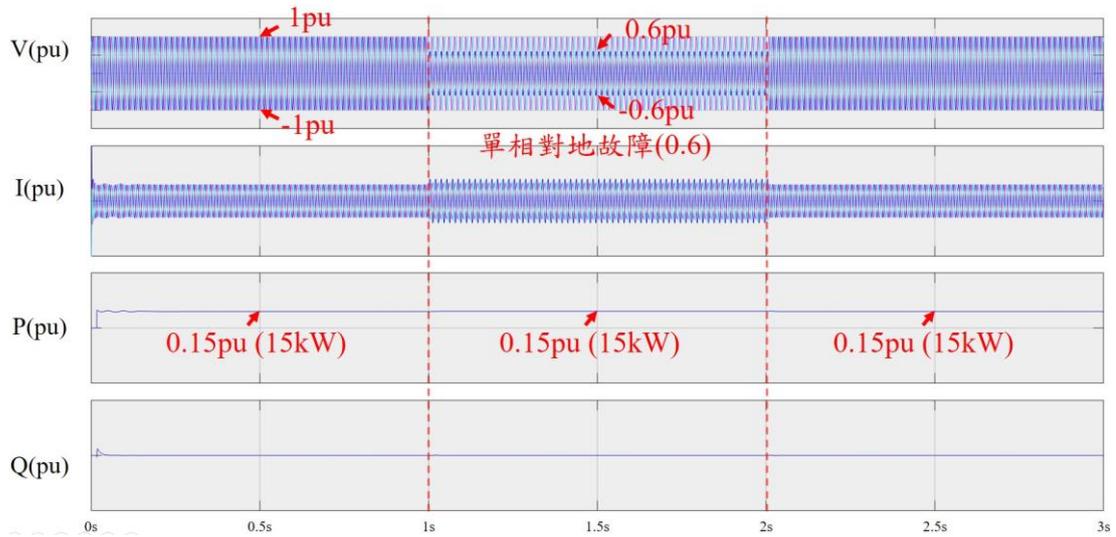


圖 6.19 儲能之電壓、電流、實功、虛功

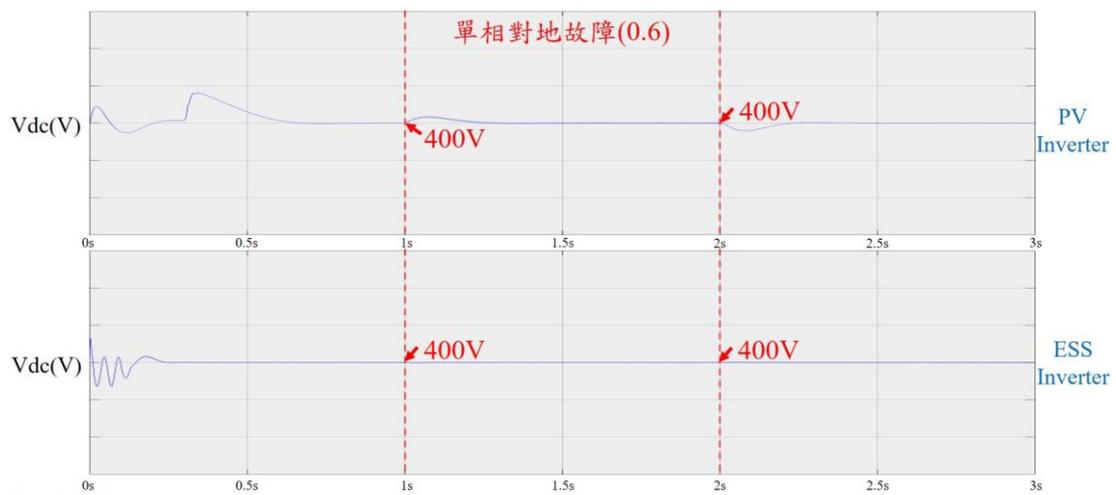


圖 6.20 PV 及儲能之直流鏈電壓

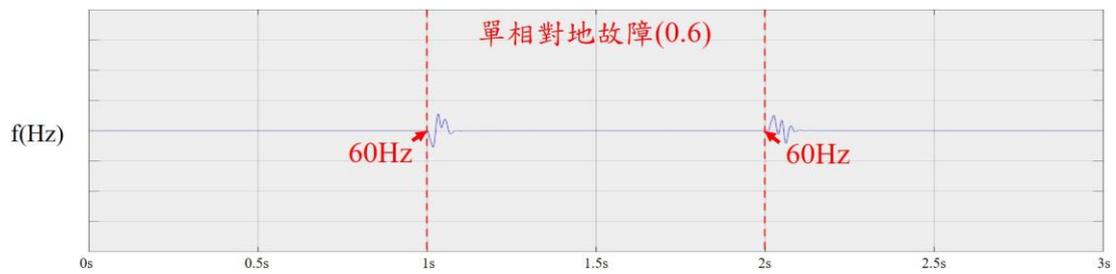


圖 6.21 市電之頻率

6.4 市電發生兩相對地故障，故障程度 0.6

模擬架構如圖 6.22 所示，兩系統於 AC 側併聯於市電，模擬併網時，儲能系統做 PQ 控制，太陽能系統做 MPPT 控制，市電在 1s ~ 2s 發生兩相對地故障，且故障程度為 0.6。

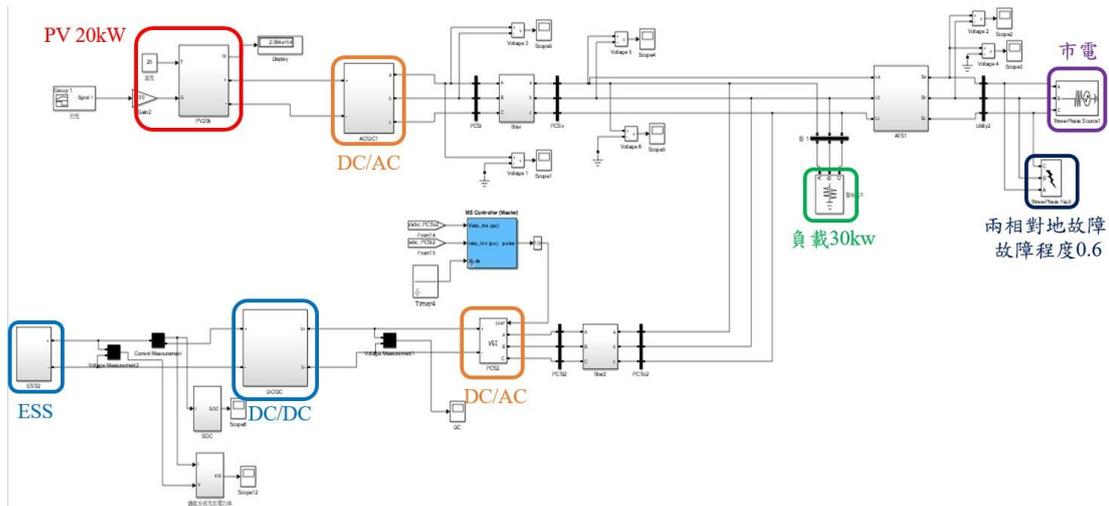


圖 6.22 微電網系統故障環境 (兩相對地故障且故障程度 0.6)

當日日照充足($1000W/m^2$)時，PV 之 DC/DC 做 MPPT 追蹤，其輸出功率為 20kW，儲能之 DC/AC 做 PQ 控制，其輸出功率為 15kW，負載為 30kW。圖 6.23-圖 6.26 別為當市電發生兩相對地故障時，市電、負載、PV、儲能之電壓、電流、實功、虛功，圖 6.27 為當市電發生兩相對地故障 0.6 時，PV、儲能之直流鏈電壓，圖 6.28 為當市電發生兩相對地故障 0.6 時，市電之頻率。在 1s ~ 2s 兩相對地故障期間，由於 PV 與儲能系統都是 MPPT 及定功率控制，B, C

相電壓大幅下降，導致 B, C 相電流明顯的上升，其輸出功率在故障期間不變；負載為 30kW 之純電阻性負載，在 1s ~ 2s 兩相對地故障期間，由於 B, C 相電壓大幅下降，使 B, C 相電流隨之下降，其所需功率變為 16kW，市電從吸收功率 5kW 變為吸收功率 19kW。PV 之 DC/AC 做直流鏈電壓控制 400V，儲能之 DC/DC 做直流鏈電壓控制 400V，在 1s ~ 2s 兩相對地故障期間，直流鏈電壓產生波動，如圖 6.27 所示。在 1s 發生故障與 2s 排除故障時，市電頻率產生震盪，如圖 6.28 所示。

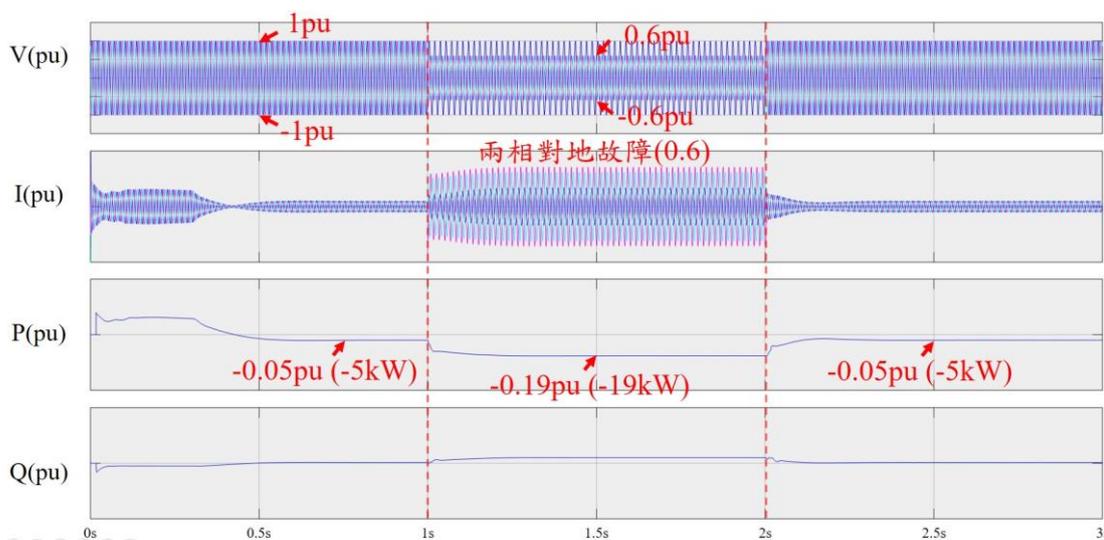


圖 6.23 市電之電壓、電流、實功、虛功

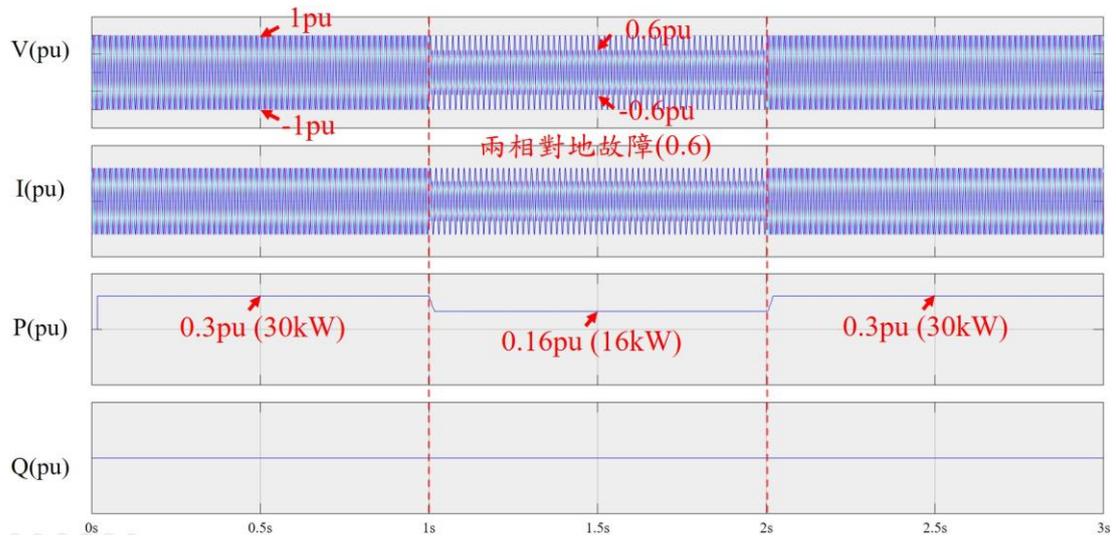


圖 6.24 負載之電壓、電流、實功、虛功

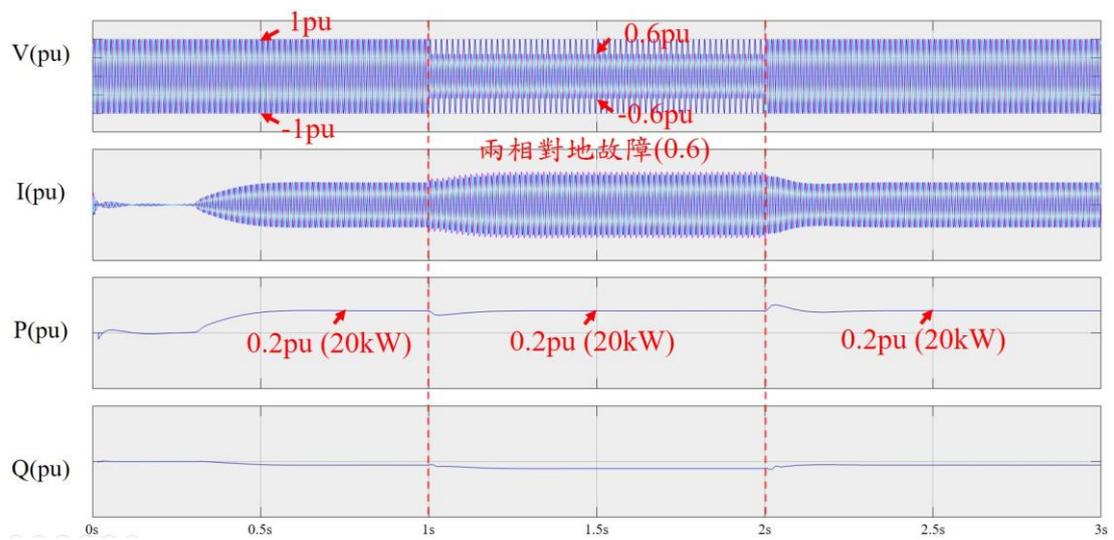


圖 6.25 PV 之電壓、電流、實功、虛功

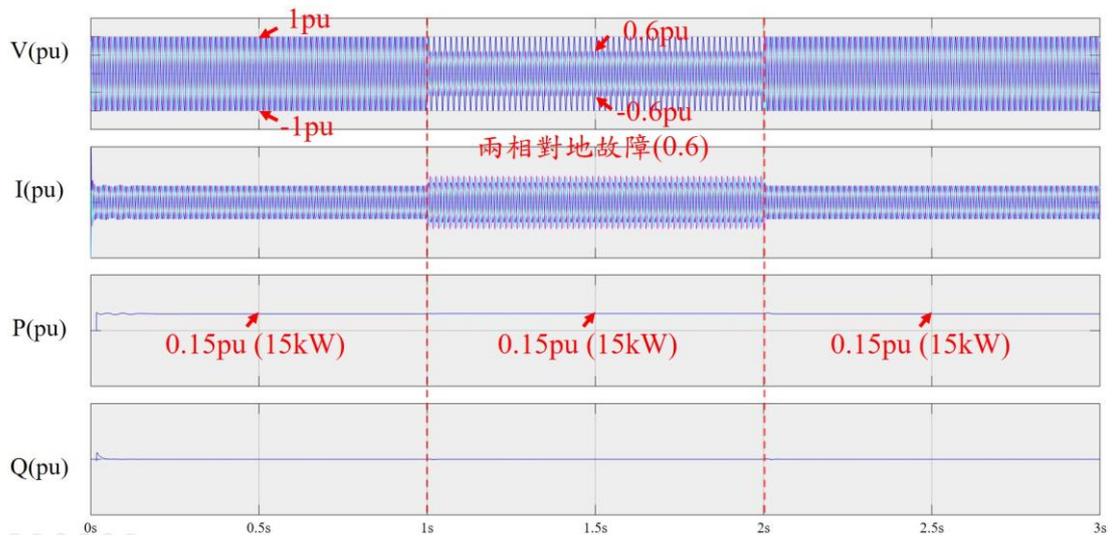


圖 6.26 儲能之電壓、電流、實功、虛功

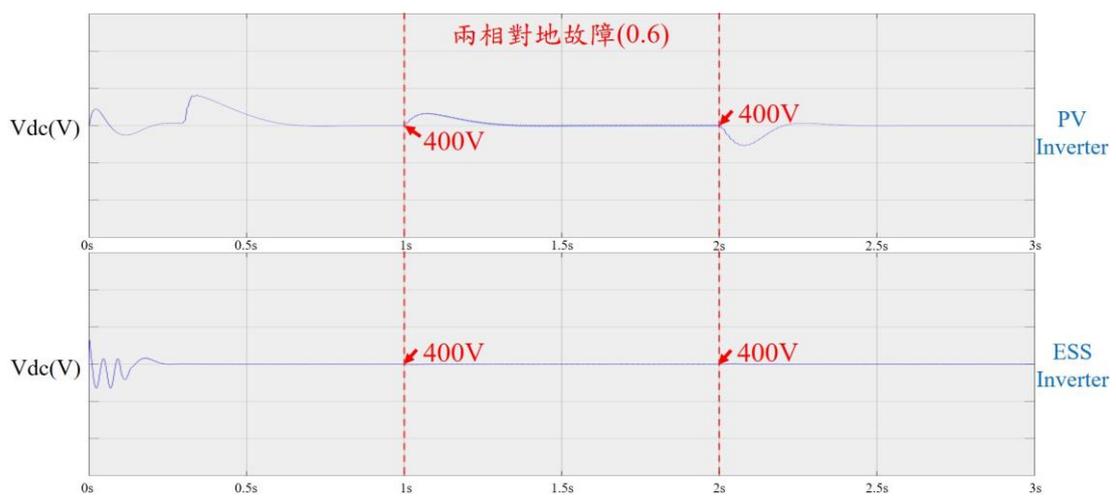


圖 6.27 PV 及儲能之直流鏈電壓

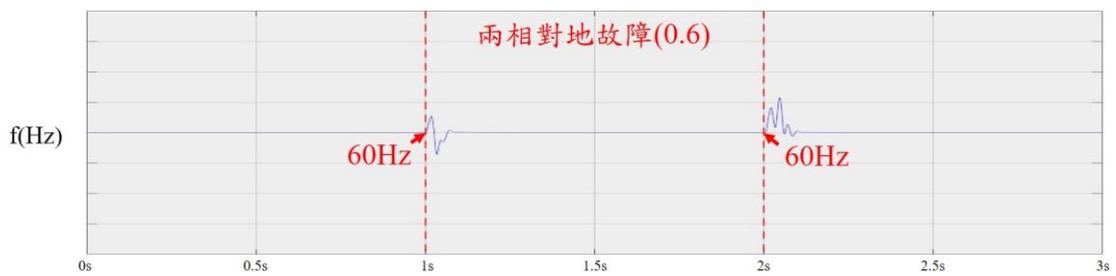


圖 6.28 市電之頻率

七、研究建立故障訊號分析技術

隨著分散式發電系統的發展，微電網的相關技術已在許多文獻中進行分析討論，其中由於微電網電力來源的不穩定性，如何確保系統的可靠度也是討論的對象之一。此一檢測電力品質的技術稱作孤島檢測，其中又分為主動式與被動式，目前發展蓬勃的是主動式孤島檢測技術，發生孤島運轉現象時則跳脫併網，而本文之應用在於微電網併網運轉時發生的電壓暫態，建立能夠立即對異常訊號進行反應的系統。

而為了偵測電力異常事件，許多小波轉換的應用方法便可以納入討論，如小波神經網路或小波運算結果配合神經網路，其中有文獻[12]提出了以小波神經網路作為偵測法，能夠僅以半週期的數據，在存在干擾的情形下準確估計出主要的低次諧波，或是將小波轉換結果輸入類神經網路學習、歸類，可以對各種瞬態事件，例如瞬間中斷，電容器切換，電壓驟降/驟升，諧波失真和閃爍等進行檢測和有效地分類[13]。除神經網路外，模糊系統也可結合小波運算，如有人提出了結合小波轉換與模糊理論的電力品質分析及辨識系統[14]，用以改善傳統電力品質分析與評估方法的缺失。

本文欲討論於短時間檢測電壓異常，故採用離散小波轉換為偵測法，並將其輸出結果輔以類神經網路、模糊系統為架構，作為決策機制，以實現快速偵測微電網異常電壓的功能。

7.1 電壓異常檢測與跳脫決策法

微電網系統中，需要電壓檢測法以確保微電網能在併網運轉時其電壓誤差在規範容許值內，用以保障市電之電力品質，並保護微電網的電力電子設備。本文應用的是離散小波轉換，能夠快速的反映原始電壓訊號中的暫態變化。

小波轉換：

小波(Wavelet)是一個快速衰減的振盪波形，在進行小波轉換(Wavelet Transform)之前，需選定一個小波作為「母小波」(mother wavelet)，透過此波形的縮放與平移，以分析輸入的訊號波型，能將訊號波型分解為小波函數(wavelet function)與尺度函數(scaling function)的組合。

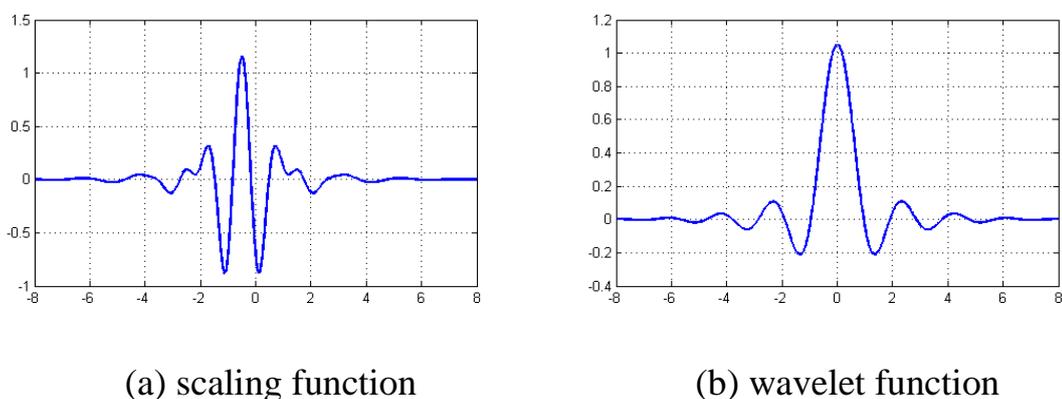


圖7.1 Meyer小波波形

小波轉換又能分為分成兩個大類：離散小波轉換(Discrete Wavelet Transform, DWT)、以及連續小波轉換(Continuous Wavelet Transform, CWT)，本文使用的是運算負荷較小的離散小波轉換。

離散小波轉換：

離散小波轉換之方程式如下，若偵測得到的信號波形 $f(t) \in L^2(R)$

可以分解為小波函數 $\varphi(t)$ 和尺度函數 $\varphi(t)$ 的組合[15]：

$$\begin{aligned} f(t) &= \sum_k c_0(k) \varphi(t-k) + \sum_k \sum_{j=1} d_j(k) 2^{-j/2} \varphi(2^{-j}t-k) \\ &= \sum_k c_{j_0}(k) 2^{-j_0/2} \varphi(2^{-j_0}t-k) + \sum_k \sum_{j=j_0} d_j(k) 2^{-j/2} \varphi(2^{-j}t-k) \end{aligned} \quad (3)$$

c_0 ：尺度係數(scaling coefficient)

d_j ：小波係數(wavelet coefficient)， $j = 1、2、3 \dots$

離散小波轉換應用於濾波器設計，可以分為高通濾波器和低通濾波器。一般而言，小波函數能分析得到輸入訊號中的時頻特性，並解析訊號的暫態變化，這一表現可視為高通濾波；尺度函數則是得到相似於輸入訊號的低頻成分，可視為低通濾波。

一般而言，離散小波轉換通常是以正交小波(orthogonal wavelet)為基底，很容易經由快速小波轉換(Fast wavelet transform, FWT)的方式實現。

多解析度分析(Multi-resolution analysis)：

當電壓異常發生時，電壓訊號的變化速度差異極大，例如突波的變化速度大、諧波的變化速度較緩和，面對這種情形，單一的解析度並不滿足檢測的需求，離散小波轉換恰可應用於這種狀況，利

用多次迭代的快速小波轉換分析輸入訊號，能將原始訊號分解成多筆不同解析度層級的訊號，而分解後的訊號能透過逆轉換重新組成原始訊號。

這裡的 c_j 為輸入訊號，第 $J-n$ 次迭代結果為第 n 階，而 c 代表低頻訊號， d 代表高頻訊號，若以多解析度分析應用於輸入訊號 c_j ，則如式(4)所示[15]：

$$\begin{aligned}c_j &= c_{j-1} \oplus d_{j-1} \\c_j &= c_{j-2} \oplus d_{j-2} \oplus d_{j-1} \\c_j &= c_{j-3} \oplus d_{j-3} \oplus d_{j-2} \oplus d_{j-1}\end{aligned}\tag{4}$$

\oplus ：離散小波算符(逆轉換)。

任意輸入波型皆能以式(4)分解為多階層的高頻與低頻訊號之組合，隨著離散小波轉換的階層遞次增加，其頻域分割會越來越精細，能夠滿足我們對於任意頻率分析的需求，圖7.2為式(4)中，各階層分解訊號的結果在頻譜上的分布。

當以離散小波演算法分解訊號時，其高頻與低頻訊號之頻域正好切割為二分之一，而下一階層中進行小波轉換分解時，頻域會再一次切割為二分之一，如此滿足多解析度分析的目的。

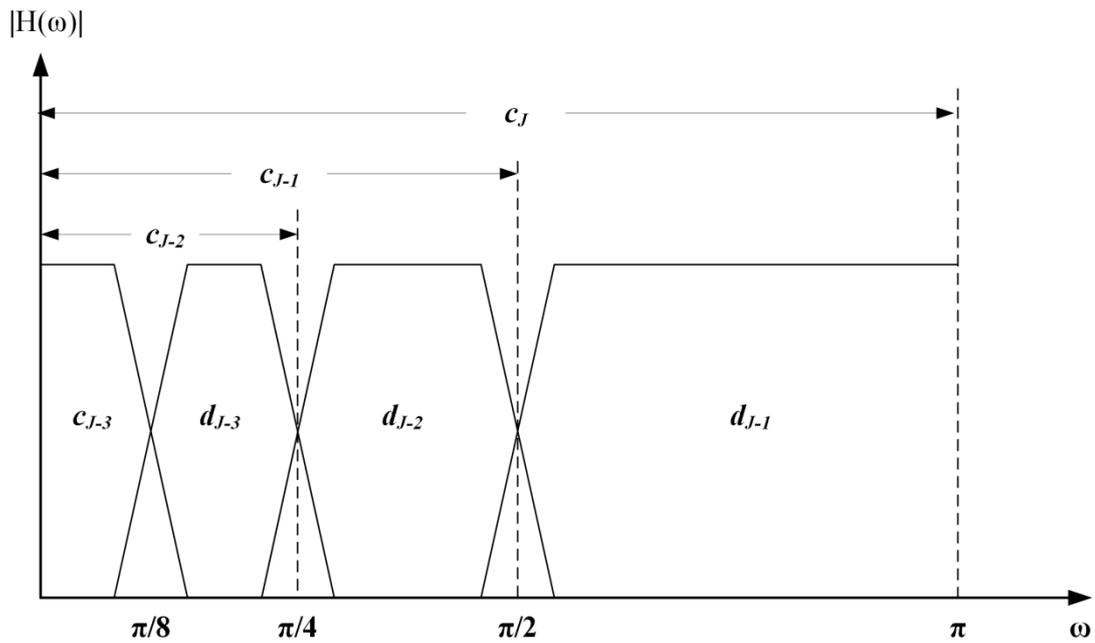


圖7.2 多解析度分析之頻域解析

通常會以快速小波轉換中的Mallat魚骨算法架構計算，每一階層根據取樣原理，對濾波後訊號進行降取樣(downsampling)，若是根據式(4)展開架構，則此三階層離散小波轉換架構如圖7.3所示。

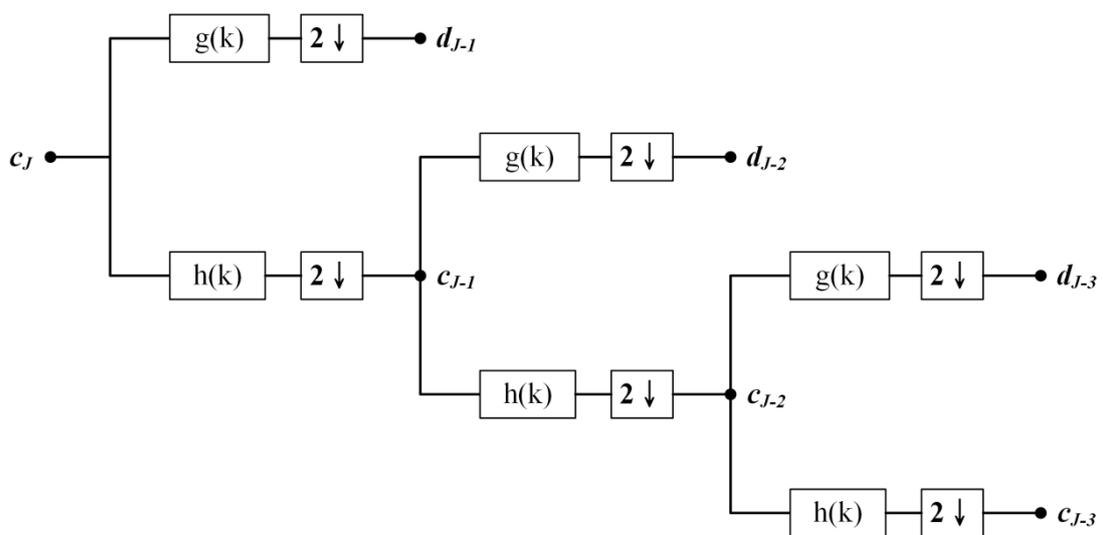


圖7.3 三階層離散小波架構

於快速小波轉換中Mallat演算法，其遞迴公式如下[16]：

$$c_{j+1}(k) = \sum_m h(m - 2k)c_j(m) \quad (5)$$

$$d_{j+1}(k) = \sum_m g(m - 2k)c_j(m) \quad (6)$$

h 為低通濾波器(Low-pass filter)，為尺度函數的係數； g 為高通濾波器(High-pass filter)，為小波函數的係數。

並且為了於對濾波後的結果進行一致性的比較，必須經由式(7)對其正規化(Normalize)。

$$\text{Normalize : } \frac{d_j(t)}{\sqrt{\sum_k |d_j(t)|^2}} \quad (7)$$

Parseval定理：

根據Parseval定理，函數之平方和等於其傅立葉轉換式平方和，代表函數在時域的能量等於其頻域的能量。在小波轉換中，我們能以下式能得到輸入訊號與各個階層係數下小波係數的能量關係[15]：

$$\int |f(t)|^2 dt = \sum_k |c_{j_0}(t)|^2 + \sum_k \sum_{j=1} |d_j(t)|^2 \quad (8)$$

透過上式，我們可以計算出電壓感測訊號於各頻域下所擁有的能量總和，藉此作為判斷訊號波型的變化劇烈程度的依據。而由式

(9)，能夠得到特定頻域所包含的能量，本文嘗試比較各個電壓異常狀況中的各階層能量，應用於截止與導通的判斷。

$$E_j = \sum_k |d_j(t)|^2 \quad (9)$$

本文中，每一次的離散小波轉換會對四分之一周期的電壓、電流訊號進行運算，而電壓異常事件發生與否的判斷會依據運算得到的電壓訊號的小波係數，與電流訊號的小波係數之平方和，作為電力訊號之辨別特徵。

7.2 偵測系統

本文旨在檢測微電網併聯運轉時的電力品質事件。靠著對離散小波轉換之結果的分析，搭配合適的決策法則，其結果將會有不同準確度。

偵測法建置概述：

如前文所述，本文採用離散小波轉換做為偵測演算法，並以其特徵值輸入決策法則，來判定是否為超出規範的電壓異常事件，以此架構做為微電網在併網模式下的電力狀態偵測法，系統之硬體架構如圖 7.4 所示，若判斷為異常則令靜態開關跳脫連結，微電網以孤島模式運轉，等待異常因素排除、微電網重新進行併網動作，同步控制器使變流器輸出之電壓與市電電壓同步，再次導通靜態開關完成市電併聯動作。

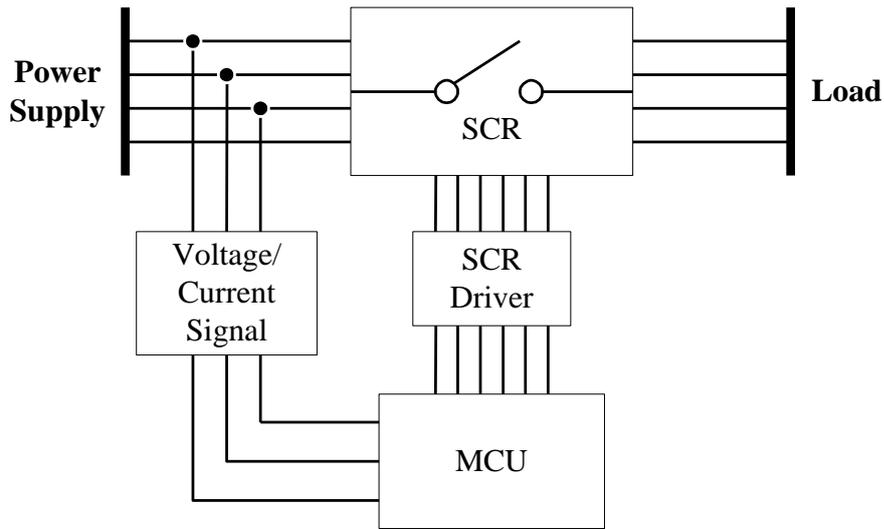


圖 7.4 系統之硬體架構

首先會以離散小波轉換對於各種電力異常事件進行分析，歸納、總結其表現以便建構模糊控制系統中的模糊規則庫，抑或是改善類神經網路系統之收斂表現。而後會透過模糊系統、類神經網路等方式，對於超出規範容許的電力異常事件進行偵測，本章會比對各方法之效能。

電力品質案例：

為解決供電問題，微電網逐漸盛行且備受重視，然而受限於其能源供應的不穩定，使得偵測在 PCC 的電壓值並即時跳脫異常電力變得重要。故在此章節我們設計許多不同的電力品質問題，如表 7.1，來檢測各種決策法則所能偵測的問題以及可靠度的表現是如何，最終透過比較找到一個較為全面的方式來進行設計。

表 7.1 電力問題案例相關參數

案例	電力問題	狀況描述 (超出規範)	狀況描述 (規範容許)
Case1	正常		
Case2	驟降與驟升	0.75 pu	0.95 pu
		1.2 pu	1.05 pu
Case3	脈衝式暫態	2~5 pu	略大於 1 pu
Case4	振盪式暫態		
Case5	諧波	5 次:0.2 pu	5 次:0.05 pu
		7 次:0.14 pu	7 次:0.05 pu
Case6	電力中斷	10 Hz 0.07 pu	不予考慮

其中，驟降(升)、諧波和暫態的設定為電力系統常見實際狀況，且因電力異常事件所發生之相位會影響離散小波濾波之數值，故此需要將相位這一因素考慮進去。

規範中對於電力品質事件有其容忍度，為了避免靜態開關頻繁誤動，致使微電網系統無法穩定併網，依照表 7.1 中所列出的電力品質問題，設計不超出規範限制的變化比例。

除了電力異常的情形外，由於雜訊污染對於離散小波轉換的干擾，故在測試各案例時參入雜訊，如表 7.2，期望整體偵測法能具有

雜訊的容忍度。

表 7.2 電力問題案例之雜訊參數

案例	電力問題	狀況描述
Noise	雜訊	20 dB

離散小波轉換之分析：

利用離散小波轉換對不同的電力異常事件進行分析，並依靠後續的決策法則以判斷。以 0~1000 的數值範圍(10 bits ADC range：0~1023)產生模擬訊號，本文設計的取樣頻率為每周期 256 點(256 points per period)，且基於對於微電網中具危害性的異常電壓快速反應的要求，每次運算會擷取 1/4 週期的波形、共 64 點進行運算，每次新擷取 1 資料點，則重新計算一次，為 Moving Window 的動作。由於擷取之資料長度有限，故此本文並不考慮電壓閃爍、頻率變動等情況。

離散小波轉換架構：

不同的基底小波應用於不同的目的，多貝西小波 (Daubechies Wavelet) 中的「db4」為本文使用的基底小波，db4 常被應用於電力訊號分析的研究中，其波形如圖 7.5 所示。多貝西小波主要應用在離散型的小波轉換，是最常使用到的小波轉換，通常使用在數位信號分析、信號壓縮跟雜訊去除。

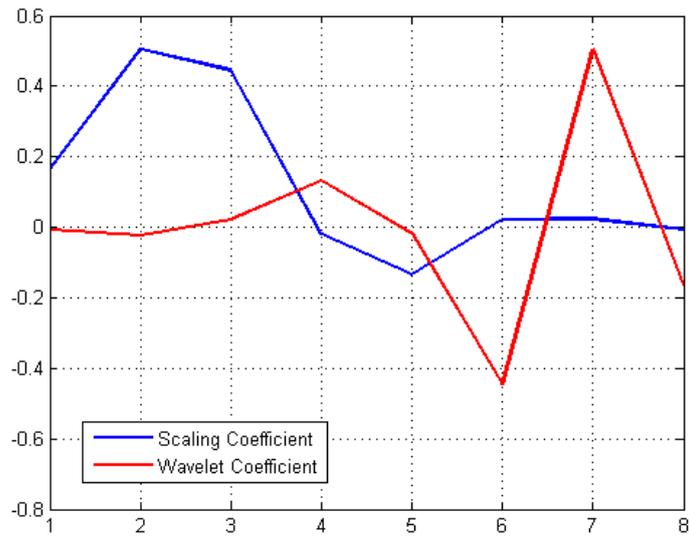


圖 7.5 多貝西小波(db4)波形

表 7.3 db4 係數表

Scaling function	$h(1)$	$h(2)$	$h(3)$	$h(4)$
	0.629	0.5055	0.4461	-0.0198
Coefficient	$h(5)$	$h(6)$	$h(7)$	$h(8)$
	-0.1323	0.0218	0.0233	-0.0075
Wavlet function	$g(1)$	$g(2)$	$g(3)$	$g(4)$
	-0.0075	-0.0233	0.0218	0.1323
Coefficient	$g(5)$	$g(6)$	$g(7)$	$g(8)$
	-0.0198	-0.4461	0.5055	-0.1629

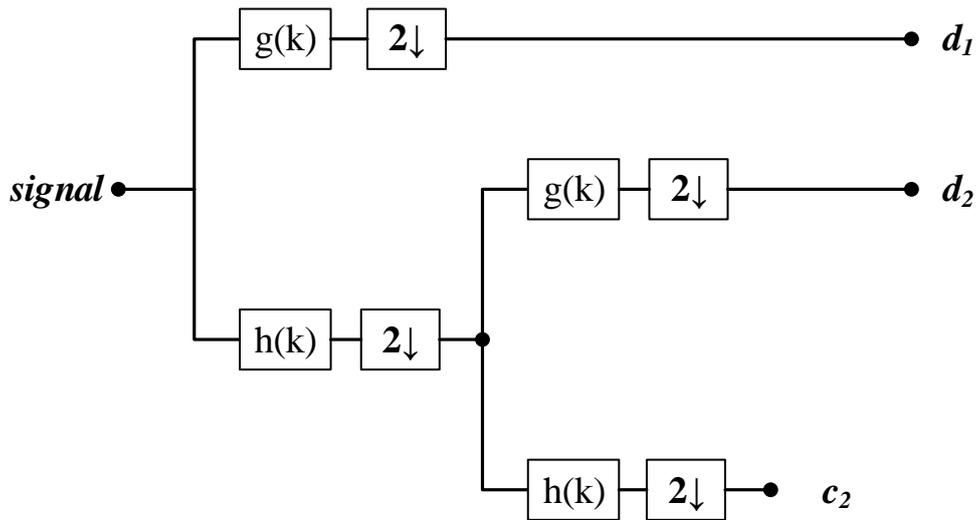


圖 7.6 二階層之小波轉換架構

並使用二階層之小波轉換架構如圖 7.6，經由兩階層的濾波過程，我們能得到原始訊號中兩個不同頻域的成分。而後由 Parseval 定理求得各頻域能量，並將濾波得到的訊號正規化(Normalize)，方便後續程序的進行。

偵測架構介紹：

本文採用模糊控制與倒傳遞類神經網路作為對於電力異常狀況是否超出規範容許的判斷方法，使用的輸入為離散小波轉換後的特徵值，經過前處理後的四個係數：

$$E = E_1 + E_2 \quad (28)$$

$$p = \frac{E_1}{E_1 + E_2} \quad (29)$$

$$Max = \frac{\max(d2)}{\sqrt{\sum \|E_2\|^2}} \quad (30)$$

$$Min = \frac{\min(d2)}{\sqrt{\sum \|E_2\|^2}} \quad (31)$$

其中， E 為二階層離散小波濾波後的高頻能量總和， p 為 E_1 在 E 中的佔比，若 $E_1 > E_2$ 則 p 大於0.5，其比例越大則越接近1， Max 與 Min 決定其波形表現，原始波形中是否有較突出的暫態變化，配合以上四個特徵值，我們能觀察波形的特徵，並用以建構適當的模糊規則與神經網路，以下介紹詳細的規則與架構。

資料集建置：

藉由 MATLAB R2013a 軟體中自製的電力訊號波形產生器，產生的波形數據中可以輕易設定振幅、相位或是頻率，也在使用者設定的時間點作電力異常的發生，也因此有了多樣性的電力異常資料能夠為決策法則作可靠度測試，與類神經網路訓練之用。

採用各電力異常事件之訊號經離散小波後的數據，共 2168 筆，作為測試之用，並在訓練類神經網路時，隨機抽取 1650 筆作為訓練之用。

模糊控制：

以 Mamdani 系統建置模糊推論，其系統如下圖：

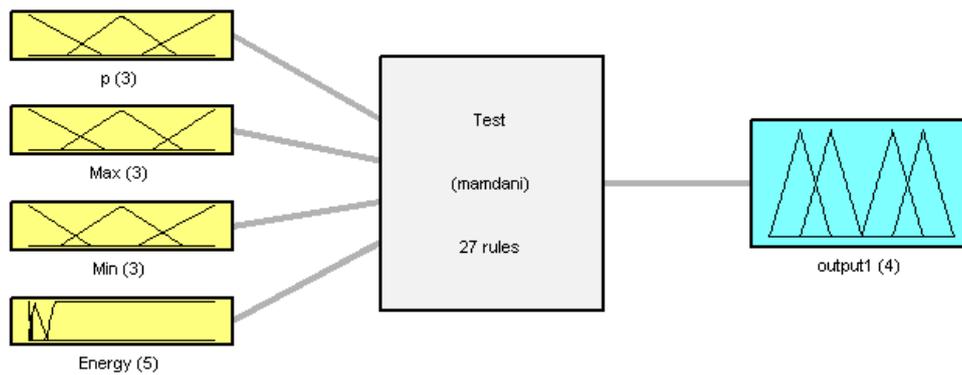


圖 7.7 本文建置之模糊推論系統

且因為模糊理論之運算法則有多種可供選擇，故列出此系統所使用的運算法則。

AND 運算子：min

OR 運算子：max

解模糊法：重心法

以上為採用的推論系統細節，而除了推論系統之種類外，模糊控制系統之架構過程為首先要決定前件部與後件部的歸屬函數，根據各電力異常事件的表現，設計規則庫中包含的模糊規則。

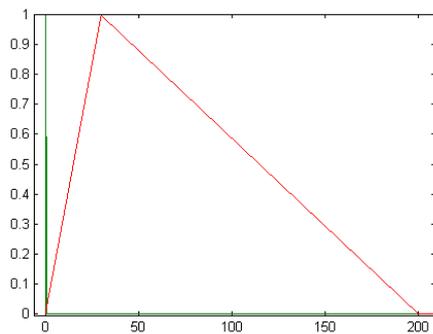
前件部：

因為於數值上跨度較大，歸屬函數間的重合範圍小，僅用於條件上的設定，因此前件部所有歸屬函數皆以 trimf 為主。

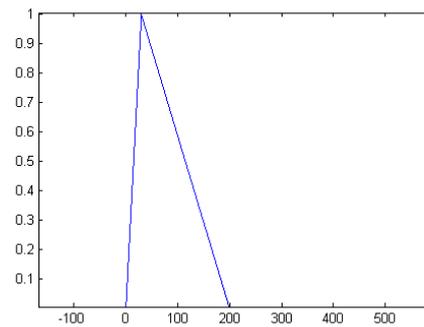
表 7.4 E_2 歸屬函數設定

E_2	Range
	[0 20000]

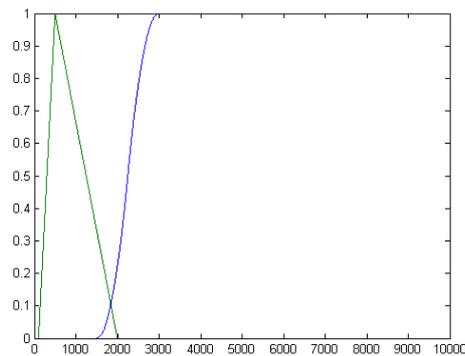
No.	Name	Type	Params
MF1	Zero	trimf	[-1000 0.001 0.1]
MF2	Decimal	trimf	[0 0.1 1]
MF3	Digit	trimf	[0.1 30 200]
MF4	Hundred	trimf	[100 500 2000]
MF5	Thousand	smf	[1499 2999]



(a) MF1、MF2



(b) MF3



(c) MF4、MF5

圖 7.8 E_2 歸屬函數圖形(a) MF1、MF2(b) MF3(c) MF4、MF5

表 7.5 p 歸屬函數設定

p	Range		
	[0 2]		
No.	Name	Type	Params

MF1	Low	trimf	[-0.8 0 0.8]
MF2	Band	trimf	[0.4 1 1.6]
MF3	High	trimf	[1.2 2 2.8]

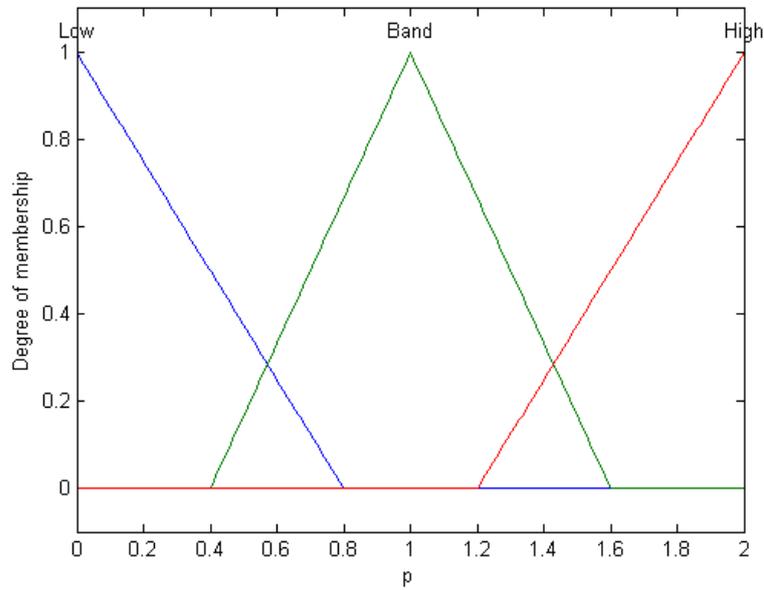


圖 7.9 p 歸屬函數圖形

表 7.6 Min 歸屬函數設定

Min	Range		
	[-1 0.2]		
No.	Name	Type	Params
MF1	Big	trimf	[-1.48 -1 -0.6]
MF2	Mid	trimf	[-0.8 -0.4 0]
MF3	Small	trimf	[-0.3 0.2 0.68]

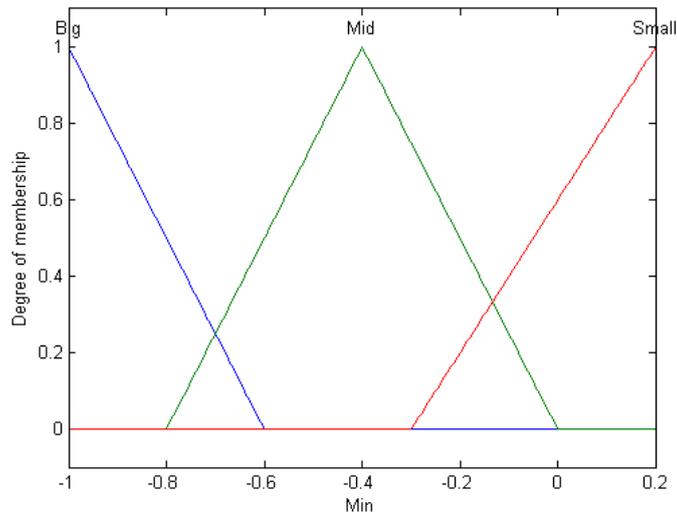


圖 7.10 *Min* 歸屬函數圖形

表 7.7 *Max* 歸屬函數設定

<i>Max</i>	Range		
	[-0.2 1]		
No.	Name	Type	Params
MF1	Small	trimf	[-0.68 -0.2 0.3]
MF2	Mid	trimf	[0 0.4 0.8]
MF3	Big	trimf	[0.6 1 1.48]

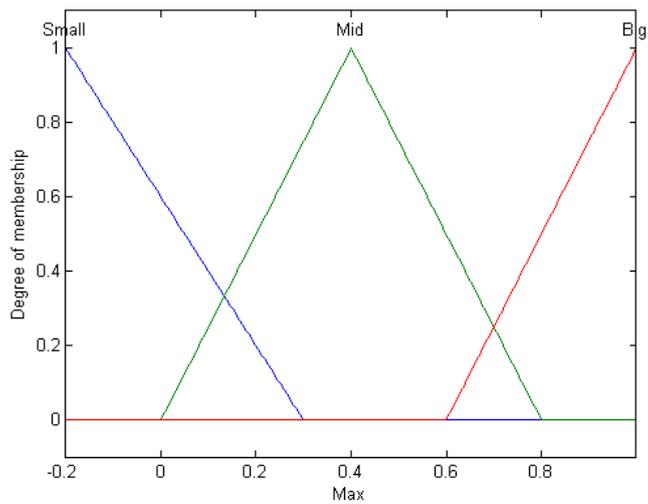


圖 7.11 *Max* 歸屬函數圖形

後件部：

設定受件部輸出為截止與否(0/1)，並設置了4種輸出集合。ON、OFF分別為導通與截止，而POFF與PON為介於中間的模糊狀態，意指導通/截止的可能性比較大，「P」為Probable。

表 7.8 Output 歸屬函數設定

Output	Range		
	[0 1]		
No.	Name	Type	Params
MF1	OFF	trimf	[-0.25 0 0.25]
MF2	POFF	trimf	[0 0.25 0.5]
MF3	PON	trimf	[0.5 0.75 1]
MF3	ON	trimf	[0.75 1 1.25]

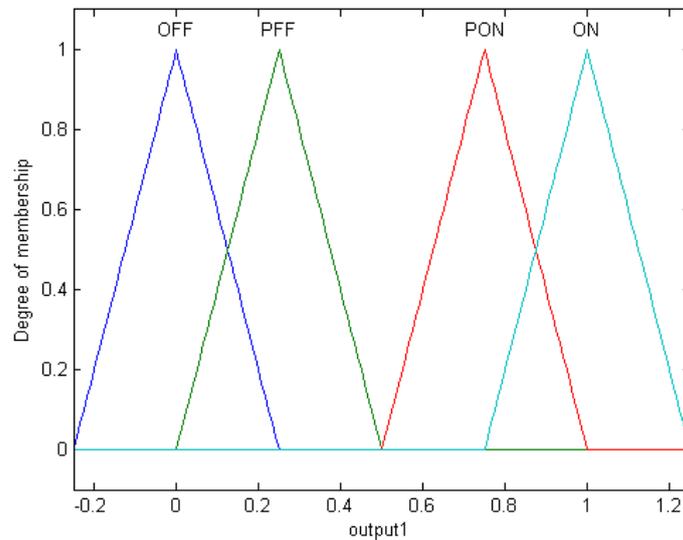


圖 7.12 Output 歸屬函數圖形

模糊規則：

建立模糊規則共 27 條如下：

表 7.9 模糊規則列表

No.	IF				THEN
	p	$\wedge \max(d2)$	$\wedge \min(d2)$	$\wedge E_2$	Output
1	High	Mid	Mid	Thousand	PON
2	High	Mid	Mid	Hundred	ON
3	High	Mid	Mid	Digit	ON
4	High	Mid	Mid	Decimal	ON
5	High	Big	Small	Thousand	OFF
6	High	Big	Small	Hundred	PON
7	High	Big	Small	Digit	ON
8	High	Big	Small	Decimal	ON
9	High	Small	Big	Thousand	OFF
10	High	Small	Big	Hundred	PON
11	High	Small	Big	Digit	ON
12	High	Small	Big	Decimal	ON
13	Band	Big	Small	Thousand	OFF
14	Band	Big	Small	Hundred	PON
15	Band	Big	Small	Digit	ON
16	Band	Big	Small	Decimal	ON
17	Band	Big	Small	Zero	ON
18	Band	Small	Big	Thousand	OFF
19	Band	Small	Big	Hundred	PON
20	Band	Small	Big	Digit	ON
21	Band	Small	Big	Decimal	ON

22	Band	Small	Big	Zero	ON
23	Low	Mid	Mid	Thousand	OFF
24	Low	Mid	Mid	Hundred	OFF
25	Low	Mid	Mid	Digit	OFF
26	Low	Mid	Mid	Decimal	POFF
27	Low	Mid	Mid	Zero	ON

考慮之前的分析，簡化原本 $3 \times 3 \times 3 \times 5 = 135$ 條規則，排除了未出現於分析中的前件部條件，並以能量數值 E_2 輔助判斷是否在容許內。下表將對於各電壓異常狀況所設定的規則考量條件列出，為方便了解，表中排除了曖昧的模糊地帶。

表 7.10 模糊規則說明

	IF				THEN
	p	$\wedge \max(d2)$	$\wedge \min(d2)$	$\wedge E_2$	Output
Normal	Low	Mid	Mid	Zero	ON
Noise	High	Mid	Mid	Thousand	OFF
Harmonic	Low	Mid	Mid	Digit	OFF
Sag	High	(Small, Big)		Thousand	OFF
		(Big, Small)		Digit	ON
Swell	High	(Small, Big)		Thousand	OFF
		(Big, Small)		Digit	ON
Spike	High	(Small, Big)		Thousand	OFF
		(Big, Small)		Digit	ON
Oscillation	High	(Small, Big)		Thousand	OFF
		(Big, Small)		Digit	ON

其中作為抗雜訊機制的 **Noise** 條件，考慮其相對於驟升驟降等條件之不同僅有 Max、Min，當 Max、Min 表現出(Mid, Mid)時則觸發此條件。

而 **Sag**、**Swell**、**Spike**、**Oscillation** 等暫態較大的條件共用了模糊規則，於表中可以發現這些狀況考量條件一樣，這一點造成了本文設計模糊系統的缺點：這些狀況雖然相似但實際於能量值 E_2 的容許值能在之前的討論中發現，並不相同，若是容許範圍增大，則有可能令系統無法偵測到驟升驟降，若是容許範圍減小，則會使系統誤動作。因此在調整前件部條件 E_2 時必須有所取捨，取得我們能夠接受的平衡點。

倒傳遞類神經網路：

本文嘗試使用倒傳遞類神經網路，透過自建的訓練資料修正網路之連結權重，建立輸入的特徵值與輸出決策結果的映射關係，並與其他方法的結果進行對照。

輸入層為 4，隱藏層使用的神經元數目為 10 個，輸出 1 筆範圍為 0~1 數值的倒傳遞類神經網路。其架構如下圖：

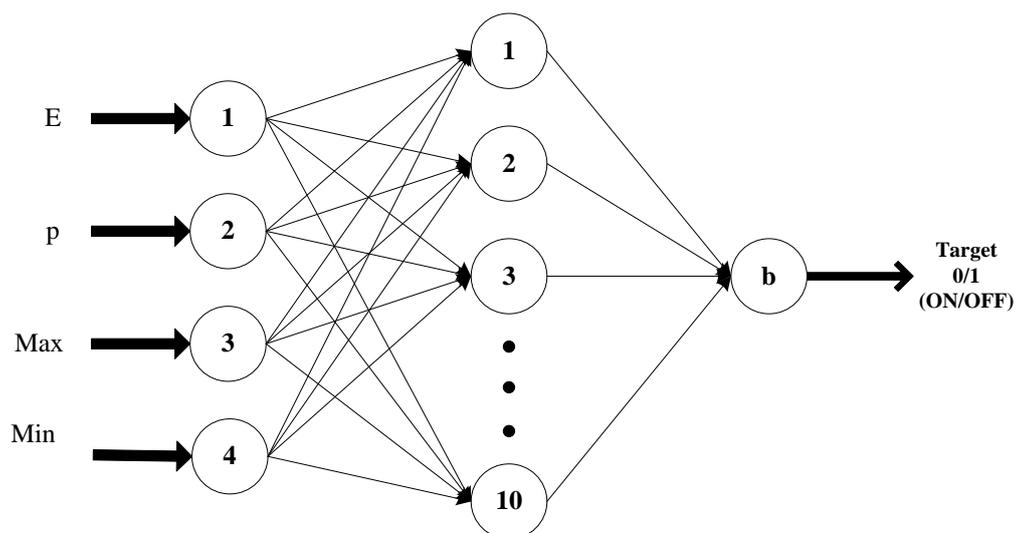


圖 7.13 應用之倒傳遞類神經網路架構

使用的學習演算法為 Levenberg-Marquardt 演算法，評估指標使用 MSE，依輸入資料集經過 89 次迭代訓練後成功收斂。

模糊倒傳遞類神經網路：

在模糊控制中，前件部中命題數目的增加會造成輸入向量維度上升，導致模糊規則數量暴增，若想要考慮所有情況以建構模糊規則庫，則太過費時費力，因此在前半部分使用模糊控制的歸屬函數，而後半部分使用類神經網路，將歸屬函數輸入倒傳遞類神經網路，以期在訓練過程中能自動建立同等、乃至於效果更好的連結映射關係。

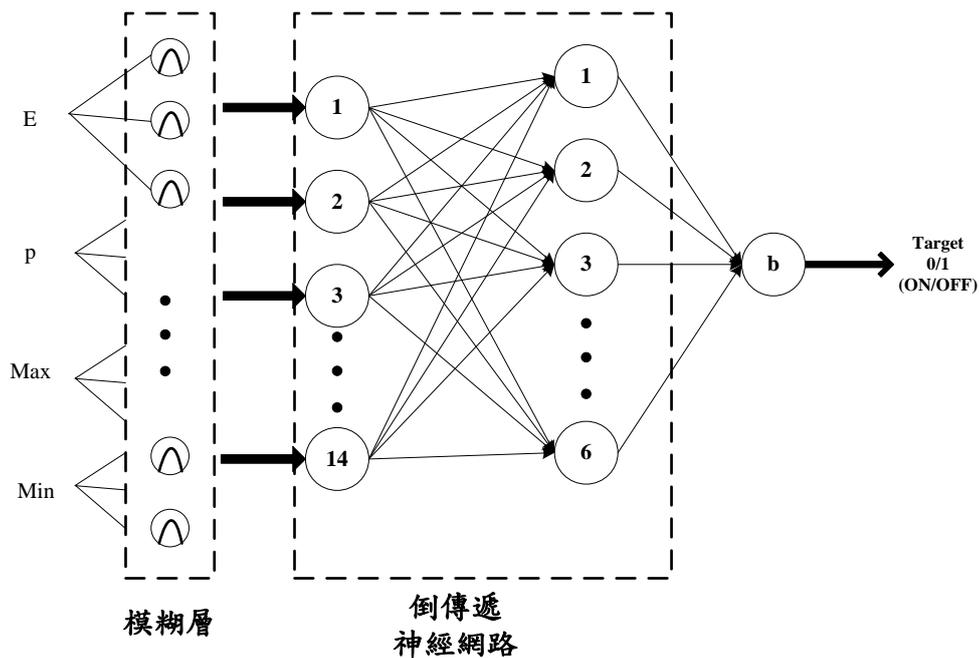


圖 7.14 模糊倒傳遞類神經網路架構

現今有多種應用小波轉換、模糊規則結合類神經的檢測方式，基本有自適應類神經模糊推論系統、小波類神經網路等。而本文僅由離散小波轉換的輸出結果，結合後端的決策法則，以期達成克服雜訊汙染對於離散小波轉換的干擾，並有效的偵測電壓訊號中的異常。

根據模擬結果，我們可以發現單純以容許值進行判斷會令系統誤判，若以調整容許值大小的方式因應，則會使原先能夠偵測得到的異常狀況被忽略，且發生相位的不同一樣會造成誤判與忽略之間的難以取捨，嘗試來回調整容許值卻難以得到足以應付所有狀況的平衡點。

對於雜訊的干擾，唯有模糊控制架構能夠較為有效的抵抗，其

次是模糊倒傳遞神經網路，而單純的倒傳遞神經網路則沒有抵抗干擾的效果。本文所嘗試使用的三種決策法對於失真率較大的諧波能夠有偵測效果，但於雜訊干擾時則會失效，且諧波並非是應該截止的電力異常狀況，而是使電力品質降低的因素。

對於驟升、驟降、電力中斷而言，其頻域能量與發生相位、變化值(pu)息息相關，與容許值檢測法相同，造成誤判與忽略之間的難以取捨，同時有雜訊的部分特徵表現亦與這些狀況雷同，這些因素干擾了模糊系統的表現。而模糊倒傳遞神經網路與倒傳遞神經網路皆能有較好的表現。對於暫態如脈衝暫態、振盪，其特徵明顯，判斷條件不會與其他電力事件混淆，因此所有架構應用於暫態都能夠有效偵測，且不容易被雜訊所干擾。

表 7.11 模擬結果總結

	容許值	模糊系統	倒傳遞類神經網路	本研究方法
正常	○	○	部分	○
電壓驟升	○	部分	○	○
電壓驟降	○	部分	○	○
諧波	×	○	○	○
脈衝暫態	○	○	○	○
電壓振盪	○	○	○	○
電力中斷	部分	×	○	○
抵抗雜訊	×	○	×	○

註 1：○表示具有偵測能力，×則否，「部分」表示在一部份資料點

時具有偵測能力。

八、饋線主幹(FCB、FTU)、分歧線(CB、FUSE、FI)與微電網(ACB)之動態保護協調設計研究

核研所微電網的保護協調目前主要係以高壓側的六氟化硫斷路器(GCB)、主變二次側的空氣斷路器(ACB)、靜態開關(SS)以及各分支的電磁開關(MC)及無熔絲開關(NFB)所組成，如圖8.1所示。

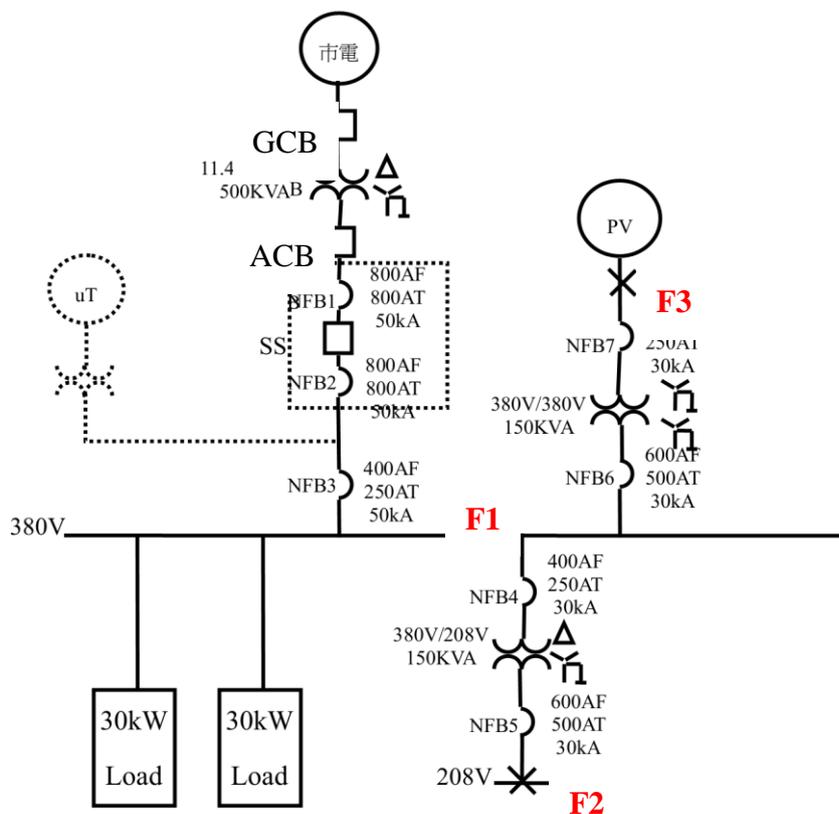


圖 8.1 核研所微電網保護協調架構

本研究將測試當微電網內發生單相接地故障及三相短路故障時，目前所建置分支及幹線上的 SS、ACB 及 NFB 是否協調。由於微電網內分散式電源提供的故障電流遠低於市電提供的故障電流，

因此當微電網操作於市電併聯模式時，系統的保護協調主要由無熔絲開關組成，且微電網系統內的數位電驛不會因為偵測到故障電流而使電磁開關跳脫。若微電網外部發生故障，則微電網與台電系統責任分界點上的靜態開關(SS)則會動作，微電網進入孤島運轉。饋線斷路器(FCB、FTU)目前設定之保護裕度充分，以下討論圖 8.1 中 F1-F3 發生故障時斷路器動作之合理性。

表 8.1 F1 發生故障斷路器動作時間(sec)

	單相接地故障	三相故障
GCB	20.29	13.38
ACB	0.061	0.061
NFB1	0.031	0.0264
SS	0.29	0.29
NFB2	0.031	0.0264
NFB3	0.021	0.021

表 8.2 F2 發生故障斷路器動作時間(sec)

	單相接地故障	三相故障
GCB	不跳脫	不跳脫
ACB	0.081	0.061

NFB1	40.1	50
SS	0.29	0.29
NFB2	40.1	50
NFB3	0.033	4.58
NFB4	0.033	4.58
NFB5	0.027	0.036

表 8.3 F3 發生故障斷路器動作時間(sec)

	單相接地故障	三相故障
GCB	不跳脫	不跳脫
ACB	0.081	0.061
NFB1	43.1	40.1
SS	0.29	0.29
NFB2	43.1	40.1
NFB3	0.031	0.031
NFB6	5.01	4.73
NFB7	0.031	0.031

由結果發現，故障電流為上游台電系統提供時，不同故障位置發生三相故障時，較靠近故障位置的無熔絲開關會在 1~1.5 cycle 跳

脫隔離故障，若無熔絲開關未動作，則 ACB 亦會於 4~5 cycle 內動作。由於目前微電網內使用的 SS 動作時間(電驛偵測及斷路器跳脫)將近 1 秒，因此可能造成故障點上游的 NFB 會比 SS 先動作。若 F1 位置發生單相接地故障，且線路上的無熔絲開關及 ACB 皆未動作，則保護設備僅剩主變壓器一次側的 GCB，GCB 電驛的動作時間為 20.29 秒，不利於電源側的線路保護。SS 比上游的 ACB 較遲動作，失去 SS 快速跳脫的功能。

參、主要發現與結論

本計畫已完成依據核能所建置微電網模擬，並透過 Marlab\Simulink 驗證微電網系統相關控制法則。此外，並依此探討分散式電源在不同運作模式下，當市電電壓及頻率超出併網規範時之故障電壓與電流特性分析，由上述模擬結果可知，當併網運轉且市電超過電壓併網規範時，分散式電源採用 PQ 控制均能維持定功率輸出，惟當市電超過頻率併網規範時，其分散式電源在暫態時會有較明顯功率波動，進而會影響系統用電安全。此外，若儲能系統在併網時以 VF 控制，則因控制法則及相角問題將會產生虛功率。再者，本計畫亦探討分析饋線主幹、分歧線與微電網之動態保護協調設計，提出故障訊號分析技術、故障環境建立測試與模型驗證。

本研究使用離散小波轉換能夠有效找出波形訊號中，使用容許值檢測法並不能因應市電中原本包含的電力品質因素，因此本文提出以模糊理論與倒傳遞神經網路結合的模糊倒傳遞神經網路，模擬結果表明引入新檢測法能夠提升判斷之可靠度。微電網保護協調方面，在微電網併網時，分散式電源提供的故障電流影響不大；而當微電網孤島運轉時，分散式電源的故障電流很小，因此微電網切換至孤島運轉時，電驛的設定須設定較為靈敏，以免發生電驛誤動作的情形。

目前研究成果

1. Cheng-I Chen, Chien-Kai Lan, Yeong-Chin Chen, Chung-Hsien Chen, and Yung-Ruei Chang, “Wavelet Energy Fuzzy Neural Network-Based Fault Protection System for Microgrid,” *Energies*, submitted, pp. 1-12, 2019.

2. Cheng-I Chen, Yeong-Chin Chen, Chung-Hsien Chen, Yung-Ruei Chang, “Regulation of DC-Link Voltage for Shunt Active Power Filter by Using Radial Basis Function Neural Network-Based Control Strategy,” *Proceedings of International Conference on Researches in Science and Technology*, 9th November, 2019, Taipei, Taiwan, pp. 1-6.

肆、參考文獻

- [1] I. J. Balaguer and F. Z. Peng, “Control for grid-connected and intentional islanding operations of distributed power generation,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, 2011.
- [2] 吳財福、陳裕愷、張建軒，*太陽光電能供電與照明系統綜論*，第二版，全華科技圖書股份有限公司，民國 96 年。
- [3] F. Pai and S. Huang, “A detection algorithm for islanding prevention of dispersed consumer owned storage and generating units,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 16, no. 4, 2001.
- [4] K. H. Tan, C. W. Lan, “DG system using PFNN controllers for improving islanding detection and power control,” *Energies*, vol. 12, no. 3, pp. 1-19, 2019.
- [5] M. Khodaparastan, H. Vahedi, F. Khazaeli, and H. Oraee, “A novel hybrid islanding detection method for inverter-based DGs using SFS and ROCOF,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol 32, 2162–2170, 2017.
- [6] IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems, IEEE Std. 929-2000.
- [7] IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Std. 1547-2018.
- [8] H. Laaksonen and K. Kauhaniemi, “Synchronized re-connection of island operated LV microgrid back to utility grid,” *2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe*, Oct. 2010, pp.1-8.
- [9] N. W. A. Lidula and A. D. Rajapakse, “Voltage balancing and

- synchronization of microgrids with highly unbalanced loads,” v, Mar. 2014, pp. 907-920.
- [10] K. H. Tan, F. J. Lin, C. M. Shih, C. N. Kuo, “Intelligent control of microgrid with virtual inertia using recurrent probabilistic wavelet fuzzy neural network,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, DOI:10.1109/TPEL.2019.2954740, 2019.
- [11] K. H. Tan, F. J. Lin, J. H. Chen, Y. R. Chang, “Intelligent controlled shunt active power filter for voltage and current harmonic compensation in microgrid system,” *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, vol. 41, no. 4, pp. 269-285, 2018.
- [12] Sachin K. Jain, S. N. Singh, “Low-Order Dominant Harmonic Estimation Using Adaptive Wavelet Neural Network,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 61, Jan. 2014.
- [13] Zue-Lee Gaing, “Wavelet-based neural network for power disturbance recognition and classification,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 19, Oct. 2004.
- [14] 樊俊暉，「設計與實現結合小波與模糊理論之電力品質分析晶片」，淡江大學電機工程學系碩士論文，中華民國九十三年七月。
- [15] C. W. Wang, Y. Y. Hong, “Identification of Power Switching Using Wavelet Transform and Neural Network,” Chung Yuan Christian University, 2003.
- [16] W. L. Kuo, “A DSP Based Power Disturbance Recognition System Using Wavelet Transform and Neural Networks,” National Changhua University of Education, 2011.
- [17] 蘇木春、張孝德，「機械學習：類神經網路、模糊系統以及基因演算法則」，全華圖書股份有限公司，中華民國 101 年 2 月。