

行政院原子能委員會核能研究所

委託研究計畫研究報告

配電系統漸進式輔助調控技術之研究

**Research on Progressive Auxiliary Regulation Technique of
Distribution System**

計畫編號：111A012

受委託機關(構)：台灣氫能與燃料電池學會

計畫主持人：陳正一

聯絡電話：03-4227151 轉 34526

E-mail address：cichen@ee.ncu.edu.tw

協同主持人：談光雄

研究期程：中華民國 111 年 3 月至 111 年 12 月

研究經費：新臺幣 90 萬元

核研所聯絡人員：陳宏都

報告日期：111 年 12 月 5 日

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	10
一、分析國內外配電系統擾動與故障案例	10
(一) 電壓驟升與驟降	11
(二) 電壓閃爍	13
(三) 諧波汙染	15
(四) 三相電壓不平衡	18
(五) 電力中斷	20
二、提出配電網發送至微電網之調度命令與通訊格式規劃	25
三、探討配電系統受再生能源等不同擾動與系統故障時，提出微 電網分散式電源之漸進式輔助調控策略邏輯	34
(一) 系統簡介	34
(二) 系統硬體架構	34
(三) 多模式漸進式輔助電力調節系統工作原理	36
(四) 補償策略	40
(五) 電壓相位偵測技術	45
(六) 控制策略與方法	50
(七) 模糊派翠類神經網路	56
四、建構微電網模型，並以即時模擬驗證所提之漸進式輔助調控 策略邏輯	69

(一) 本文系統模擬環境建置.....	69
(二) 系統直流鏈電壓控制分析.....	70
(三) 本文系統模式控制響應分析與比較.....	72
五、應用在核能所即時模擬系統 OPAL-RT(軟體版本為 RT-Lab 2019.2 及 Matlab 2018b)進行前述模型實測	91
(一) Case1 三相電壓驟降	91
(二) Case2 三相電壓驟升	95
(三) Case3 三相電壓不平衡	98
(四) Case4 電壓閃爍	101
(五) Case5 電壓諧波汙染	104
(六) Case6 電源端電力中斷	107
參、主要發現與結論.....	110
肆、參考文獻.....	112

中文摘要

隨著全球能源危機和環境問題日益嚴重，分散式發電和微電網技術越來越受關注，發展再生能源，邁向低碳社會，已是無可避免的趨勢，因此未來的電力系統，勢必要降低石化能源比例，擴大再生能源利用。但由於大部分分散式電源通過逆變器等電力電子設備接入大電網，幾乎不具有慣量，當分散式電源的容量增長到占大電網一定比例之後，分散式電源的無慣量特性會給大電網的穩定性造成威脅。因此若能有效整合微電網電力控制策略與相關電力品質穩定機制，必將大大的提高微電網的安全穩定性。本計畫主要目標為(1)分析國內外配電系統擾動與故障案例；(2)提出配電網發送至微電網之調度命令與通訊格式規劃；(3)探討配電系統受再生能源等不同擾動與系統故障時，提出微電網分散式電源之漸進式輔助調控策略邏輯；(4)建構微電網模型，並以即時模擬驗證所提之漸進式輔助調控策略邏輯；(5)應用在核能所即時模擬系統 OPAL-RT 進行前述模型實測。此外，本計畫將依據核能所微電網系統為基礎，建立相關配電網模型，並透過即時模擬系統探討分散式電源在不同運作模式與情境之調控策略以維護微電網系統之穩定性。

Abstract

With the global energy crisis and serious environmental problems, distributed generation and microgrid technology have drawn much attention. Development of renewable energy towards a low carbon society is an inevitable trend. Therefore, the future power system is bound to reduce the proportion of petrochemical energy and expand the utilization of renewable energy. However, since most of the distributed generations are connected to the power system through power electronic equipment such as inverters, these systems almost have no inertia. When the capacity of the distributed generations increases to a certain proportion of the power system, the inertia-free characteristics of the distributed generations would introduce the threat to the stability of power system. Therefore, if the power control strategy and related power-quality stabilization mechanisms can be effectively integrated, the security and stability of the microgrid can be greatly improved. The main objective of this project is to (1) analyze the international case studies for disturbances and faults of distribution system, (2) propose the dispatch commands and communication formats for the distribution system and microgrid, (3) propose the progressive auxiliary regulation technique for multiple distributed generations in the distribution system

under different disturbances and faults of renewable energy, (4) build up the real-time simulation model for the performance verification of proposed progressive auxiliary regulation technique, (5) apply the OPAL-RT real-time simulator in the institute of Nuclear Energy Research (INER) to examine the developed models. Besides, the microgrid system of the INER is adopted to establish the simulation models. Based on this system and real-time simulator, the regulation strategy of the distributed generators in different operating modes would be discussed to maintain the stability of the microgrid system.

壹、計畫緣起與目的

對全球的氣候異常現象越來越頻繁的趨勢下，各國政府皆大力推行減碳政策，以期減少人類活動對環境的影響。低汙染的再生能源也越來越受世人重視，但是不同於傳統電力的穩定供電，常見的再生能源如風力發電、太陽能發電皆受到天氣因素所左右，屬於間歇性能源，若直接將再生能源併入電網中可能影響電力品質與電網運轉的穩定性，為了解決分散式再生能源發電系統併網後所造成的衝擊，微電網調控技術的概念便孕育而生 [1]。

在傳統電力系統中，採用的是集中式發電，電廠中大型發電機組所產生的電力經過各級變電系統，以電纜傳輸至各地，供應用戶之所需，在長途輸送的過程中會造成電力的損耗。而分散式發電系統的位置相對於集中式發電而言，更接近於負載，故可降低電力傳輸造成的損耗，結合再生能源後能夠減緩溫室氣體排放。而微電網便是將分散式發電系統與鄰近負載整合為一具有併網連接或孤島運轉能力的電力系統，並搭配了能源管理系統與儲能設備，其具有穩定電壓及頻率功能，能有效將再生能源引入電網，並且具有尖峰用電調節的作用，可以降低大電網系統的規格與成本。

在一般情況下，微電網透過靜態開關與市電端連接，為併網運行模式，但當市電或微電網內部發生故障時，會截止靜態開關的導通將兩者斷開，微電網進入孤島運轉模式，待排除故障後，微電網

則重新連接至市電。對於一般分散式電源與市電電源之責任分界點發生孤島運轉現象時，控制系統需在 2 秒內使微電網跳脫市電併聯[2]。

本計畫考慮到微電網中若產生較為巨大的電壓暫態變化時，如電容式負載切換造成的電壓震盪，則欲要在暫態發生當下的時間點令微電網跳脫，也就是在不到一周波的時間內，就能偵測電力異常的發生，並且截止靜態開關的導通。因此本計畫提出以離散小波轉換為基礎的偵測架構，採用類神經網路技術為決策法，並與以容許值為決策法[3]的效果進行比較，探討其決策效果之優劣，以協助分析國內外配電系統擾動與故障案例，該技術能抵抗雜訊干擾以避免誤判，並正確的檢測波形中的電壓異常事件。

微電網技術已陸續在各場域建造應用，所以使用本計畫所提之漸進式輔助調控演算法可依系統情境進行電網運行模式切換，進而提升能源使用安全性與促進再生能源之滲透率。當電網所併接的大電網因機組跳電、設備故障等原因，造成電網頻率快速下降時，會對整體環境下的電力系統造成不可逆的影響與傷害，因此可以即時運轉並追隨電力系統頻率進行調頻的輔助服務系統就顯得至關重要，而透過輔助服務可在一定範圍內解決電力系統掉頻，保護用戶設備及安全。

在單一微電網下測試輔助服務時，因為電網系統內部所需之電

晶體開關元件數量繁多且操作特性繁雜，往往造成在系統模擬時所需的計算量龐大，致使模擬時間過於冗長，因此透過即時模擬器之多核處理器進行平行運算處理以減少其計算所需時間，並達到硬體迴圈之訊號即時同步的效果。在此架構下，可有效輔助電網系統之控制策略發展之便利性。因此本計畫發展漸進式輔助調控技術及即時模擬架構進行微電網電力穩定調節為當前重點研究方向。

併網運行和孤島運行兩種模式之間的靈活切換是再生能源能夠接入大電網的重要條件，當大電網發生故障時，再生能源應該迅速斷開與大電網的連接，進入孤島模式；當大電網恢復供電正常時，再生能源需要從新接入大電網，繼續併網運行。與傳統的電力系統中採用同步發電機發電不同，分散式系統中大部分的再生能源都是通過電力電子接口接入電網，因此再生能源能否穩定運行的一個關鍵是分散式系統接口逆變器控制性能的好壞[4]-[6]。因此為維持微電網穩定運轉，整合各項電力品質分析方法，進而改善而提供高效能、高準確度的量測及系統保護機制，並尋求合適之電力品質改善方式，實為不可或缺的重點項目。

美國是最先開始分散式系統研究的國家之一，「美國電力安全技術委員會」提出的分散式系統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再生能源系統的發展。目前在孤島與併網平

滑切換之同步偵測的相關技術中，鎖相迴路(phase locked loop, PLL)技術被廣泛的使用[7]-[11]。在三相系統中，採用同步參考框架鎖相迴路(synchronization reference frame PLL)以得到相位。同步參考框架鎖相迴路在電網三相平衡時具有良好的效果，但當輸入的三相訊號為不平衡或者失真的狀況下，輸出結果會受到影響。因此為了克服這個缺陷，開始有新的同步技術被提出，如解耦雙同步參考框架鎖相迴路(decoupled double-synchronous reference frame PLL)，能改善在不平衡狀況下相位角的估測能力。除了鎖相迴路之外，基於鎖頻迴路(frequency locked loop, FLL)的方式亦可以用於同步偵測，並已被證明在一般情況下是有效且準確的。使用鎖頻迴路架構的主要優點為對於瞬間電網故障所產生的相位跳躍較不敏感，因而提高了在異常電網狀態下的性能，也使得鎖頻迴路有快速的動態響應以及較低的過衝(overshoot)[12]-[13]。

此外，為維持電力供應安全與可靠、確保電力系統穩定、維持電力品質及因應偶發事故，國內外公用售電業開始向輸配電業購買輔助服務，主要含調頻備轉容量、即時備轉容量、補充備轉容量、全黑啟動及其他(如調整電壓)等服務。其中調頻服務主要因應用電負載量之即時變化性，供電與用電必須隨時保持動態平衡；此備轉容量須於 3 分鐘內反應，且須持續 15 分鐘以上。提供調頻備轉容量之設備需具備自動發電控制 AGC(Automatic Generation Control)或自

動頻率控制 AFC(Automatic Frequency Control)能力。而即時備轉服務為因應機組偶發事故後，造成系統電能之暫時性短缺，準備其容量可於短時間內補充系統短缺之電能。即時備轉容量需持續至少 1 小時。例如 2008 年 2 月 26 日，德州電力可靠度委員會為因應負載及風力發電預測失準，負載增加超乎預期及正好碰上機組跳機導致系統頻率下降，立即啟動緊急電力削減計劃，歷時約 3 小時讓系統恢復正常供電。在補充備轉服務方面，為因應系統偶發事故後補充電能短缺，其容量可使電力調度單位重新調整各項備轉容量佈署，恢復系統正常供電能力，以因應系統下次之偶發事故，補充備轉容量須持續至少 2~4 小時[14]。

目前微電網系統之相關控制技術，在世界先進國家已發展許多不同於傳統之方法，包括：(1)基於機器學習和模型預測控制的概念改良或設計新型平滑方法[15]；(2)針對太陽能功率平滑與電池儲能系統電池壽命對平滑方法進行改良與優化[16]；(3)使用基於低電壓穿越模式之儲能系統[17]；(4)在大型電網建立智慧分散式能源管理系統，讓分散式能源和負載自行運算最佳控制方案[18]；(5)將控制後的數據利用統計與經濟學找出最佳經濟化算法[19]。本計畫即針對目前國內外已具備之研究基礎，藉由提出的改良式控制技術，改善再生能源與儲能系統多模式控制之效能，並利用成熟的相關硬體架構及即時模擬系統驗證，藉以改善量測與監控之效率，以期能對

微電網各種能源有較完善且精確的調節。

隨著全球能源危機和環境問題日益嚴重，分散式發電和微電網技術越來越受關注，發展再生能源，邁向低碳社會，已是無可避免的趨勢，因此未來的電力系統，勢必要降低石化能源比例，擴大再生能源利用。但由於大部分分散式電源通過逆變器等電力電子設備接入大電網，幾乎不具有慣量，當分散式電源的容量增長到占大電網一定比例之後，分散式電源的無慣量特性會給大電網的穩定性造成威脅。因此若能有效整合微電網電力控制策略與相關電力品質穩定機制，必將大大的提高微電網的安全穩定性。本計畫主要目標為(1)分析國內外配電系統擾動與故障案例；(2)提出配電網發送至微電網之調度命令與通訊格式規劃；(3)探討配電系統受再生能源等不同擾動與系統故障時，提出微電網分散式電源之漸進式輔助調控策略邏輯；(4)建構微電網模型，並以即時模擬驗證所提之漸進式輔助調控策略邏輯；(5)應用在核能所即時模擬系統 OPAL-RT 進行前述模型實測。此外，本計畫將依據核能所微電網系統為基礎，建立相關配電網模型，並透過即時模擬系統探討分散式電源在不同運作模式與情境之調控策略以維護微電網系統之穩定性。

貳、研究方法與過程

微電網是由分散式電源(如：太陽能、風力發電)、儲能系統、能源管理控制系統、靜態開關所組成。一般情況下微電網與電力公司電網透過靜態開關連接，微電網與市電併聯運轉(併網模式)，但在電力公司電網或微電網內部發生故障時，則可利用靜態開關將兩者斷開，使微電網獨立進行運轉(孤島模式)，當故障修復後，微電網則可以重新連接至電力公司電網。近年來隨著科技快速發展，致使用電需求與日俱增，造成各類電力事件頻傳，配電系統中電力品質的問題也逐漸受到重視。常見的電力品質事件包括三相電壓驟降(升)、電壓閃爍、諧波汙染等，現如今有許多方式可以改善，除傳統的被動式濾波器外，亦有多種主動式電力濾波器，其補償效果也各有不同。為了能在穩定分散式發電系統的同時，也能適時的解決配電線路上電力品質的問題，本研究建立一多模式漸進式輔助電力調節系統，結合主動式電力濾波器之功能，當電力品質處於規範內時供應負載所需之部分電力，並在電力事件發生時透過模式切換，補償負載受到的影響。另外，本研究設計一智慧型控制器取代傳統控制器，有效的改善切換之暫態響應，以達成良好之電力品質與快速穩定供電系統之目的。本計畫主要針對微電網與配電網間之漸進式輔助電力調控策略進行研究，並透過即時模擬系統驗證計畫所開發之策略可行性。以下根據各項工作項目進行詳細說明。

一、分析國內外配電系統擾動與故障案例

電力系統擾動主要來自於電力品質不佳所形成之現象，電力品質是指在特定時間與位置之電壓、電流造成多種電力系統中電磁現

象的表現，也可理解為一個電力系統的相對穩定程度，由於現代控制技術需求，導致電力品質事件的發生與日俱增。

根據國際電工委員會(International Electrotechnical Commission, IEC)所訂定之 IEC 6100-2-5-2017 將電力品質事件做統整分類[20]，以下將說明幾個國內常見的電壓失真情形，包括：電壓驟降(Voltage Sag)、電壓驟升(Voltage Swell)、電壓閃爍(Flickers)、電壓不平衡(Voltage imbalance)與諧波汙染(Harmonics)，並以此做為所設計之多模式漸進式輔助電力調節系統的效能評估依據。

(一) 電壓驟升與驟降

- 定義：

根據 IEEE Std. 1159-2019 定義[21]，電壓驟降是指基頻電壓有效值變動於 0.1 pu 至 0.9 pu 內，電壓驟升則是基頻電壓有效值變動於 1.1 pu 至 1.8 pu 間，兩者變動持續時間皆在 0.5 個週波(cycle)至 1 分鐘以內，而根據變動持續時間又可定義不同類別的電壓驟降(升)，詳細如表 1-1 所示。電壓驟降(升)可能造成驅動器、微電腦控制器、其他電力資訊設備等使用上之影響，嚴重時甚至會發生停機的情形。

表 1-1、電壓驟降、驟升定義表

Categories	Phenomena	Typical duration	Typical voltage magnitude
Instantaneous	Sag	0.5 – 30 cycles	0.1–0.9 pu
	Swell	0.5 – 30 cycles	1.1–1.8 pu

Momentary	Sag	30 cycles – 3 sec	0.1–0.9 pu
	Swell	30 cycles – 3 sec	1.1–1.4 pu
Temporary	Sag	> 3 sec – 1 min	0.1–0.9 pu
	Swell	> 3 sec – 1 min	1.1–1.2 pu

● 現行管制規範：

依照電腦產業協會(Computer Business Equipment Manufacturers Association, CBEMA)所提供之商用供電系統之最大承受暫態過壓容許持續時間曲線，該曲線如今依舊作為許多電力設備暫態承受能力範圍之參考，以防止電壓變化等電力品質問題。如下圖 1-1 所示，由曲線可以得知負載的承受度，取決於電壓幅度變化與持續時間，曲線中間區域之上的「禁止區域」與中間區域之下的「無損壞區域」，則分別代表設備對電壓驟升與電壓驟降的承受能力。

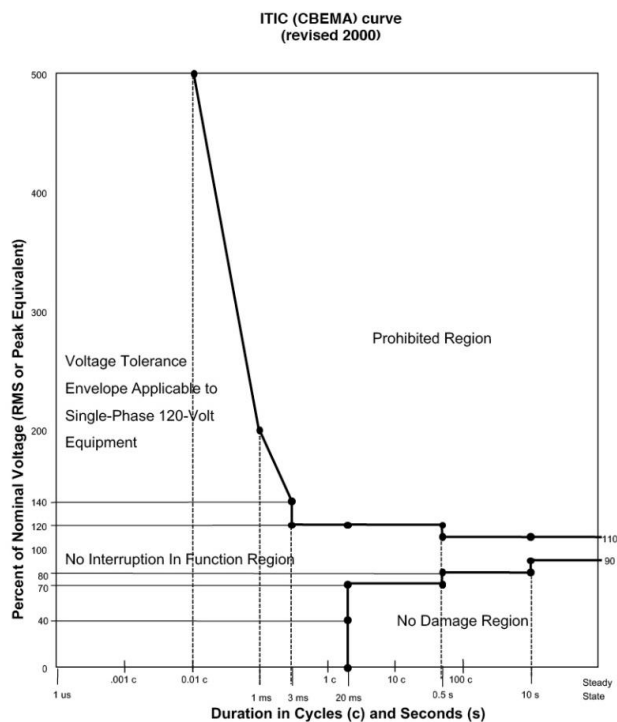


圖 1-1、CBEMA 電壓驟降容忍範圍及持續時間圖 [21]

另外，根據我國法規資料庫之電業供電電壓及頻率標準第二十六條第二項規定[22]，整理如下表 1-2 所示，一般家用負載線路之供電電壓變動率高低以不超過百分之十為限，而情形特殊者經核准則不適用該標準之規定。

表 1-2、電業法之電壓變動率標準

標稱電壓	種類	電壓變動率
220 V	電燈電壓	< 5%
	電力及電熱之電壓	< 10%
	電燈、電力、電熱混合線路	< 5%

(二) 電壓閃爍

● 定義：

由 IEEE Std. 1453-2015 定義[23]，當系統電壓產生一連串隨機或週期性的擾動，致使照明強度發生可被人眼感知的變化時，稱其為電壓閃爍(Flicker)，變化範圍則通常介於電壓額定值之 0.95 pu 至 1.05 pu 內。電壓閃爍易引起視覺上的不適，或造成馬達轉速不均，任何具有快速功率變化的負載易造成電壓閃爍，且除了負載外，微電網中再生能源的不穩定性也會導致電壓閃爍的結果。

● 現行管制規範：

日本中央電力研究所(Central Research Institute of Electric Power Industry, CRIEPI)提出一評估電壓閃爍嚴重程度方法[24]，以 ΔV_{10} 作為衡量指標，其定義為：每秒鐘變化十次之有效電壓變動值，以式(1-1)

表示如下：

$$\Delta V_{10} = \sqrt{\sum_n (a_n \cdot \bar{V}_n)^2} \quad (1-1)$$

其中 $\bar{V}_n$ 為電壓閃爍時以振幅調變頻率 f_n 為基礎計算之電壓變動量(峰對峰有效值)， f_n 則常介於 0.1 Hz 至 30 Hz 間。 a_n 則為調變頻率 f_n 之變動量等效至 10 Hz 的相對視感度系數。

針對我國電壓閃爍管制規範，同樣以 ΔV_{10} 作為容許電壓閃爍評估標準，台灣電力股份有限公司依照電弧爐及其他遽變負載用戶實施以下管制標準[25]。交流電弧爐用戶以式(1-2)或(1-3)計算出之 ΔV_{10max} 不得超過 0.45(%)：

$$\Delta V_{10max} = \frac{\Delta V_{max}}{3.6} \quad (1-2)$$

$$\Delta V_{10max} = \frac{\Delta Q_{max}}{3.6 \times SCC} \quad (1-3)$$

其中 ΔV_{10max} 為依據式(1-1)計算之最大 ΔV_{10} 之值， ΔQ_{max} 為用戶無效電力變動量之最大值，SCC 為責任分界點之最小三相短路容量，另外非電弧爐之遽變負載用戶則以式(1-4)計算之電壓變動限制最大值(ΔV_{max})作為管制標準：

$$\Delta V_{max} = \frac{\Delta Q_{max}}{SCC} \quad (1-4)$$

並依負載變動次數不同整理如下表 1-3：

表 1-3、非電弧爐遽變負載電壓變動限制值 ΔV_{max}

負載變動次數	電壓變動限制值(ΔV_{max})(%)
每秒鐘 1~3 次	0.83
每秒鐘 12~59 次	1.33
每分鐘 1~11 次	1.67
每小時 1~59 次	2.5
每日 23 次以下	3.33

(三) 諧波汙染

- 定義：

一般供電系統中所設計之系統運行頻率稱為基頻，以我國為例台電系統所提供的系統基頻為 60 Hz，而根據 IEEE Std. 519-2014 的諧波定義為基頻整數倍之正弦電壓或電流成分[26]。產生諧波的主因是電力系統中存在非線性負載，如二極體整流器、電力電子開關都容易產生諧波成分，當諧波與基頻電壓或電流結合將導致波型發生失真現象，致使設備產生過熱、壽命縮短的結果，此情況稱為諧波汙染，如下圖 1-2 為常見的五、七次合成諧波與其訊號成份。

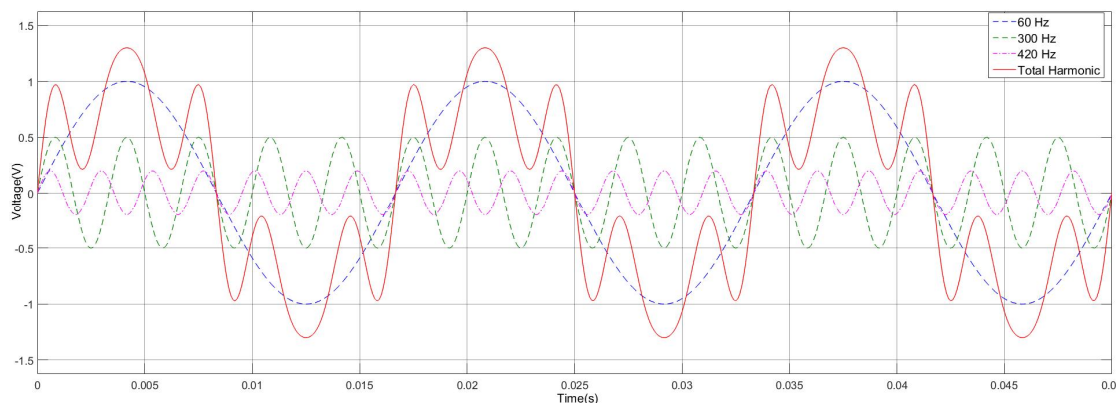


圖 1-2、五、七次合成諧波

由於諧波之定義為基頻整數倍之弦波，故我們可透過傅立葉分析將一失真之電壓波形拆解為直流成份、基頻成份與其餘頻率成份的訊號疊加，以下式(1-5)所示：

$$V(t) = V_0 + \sum_{h=1}^{\infty} V_h \sin(h\omega_1 t + \theta_h) \quad (1-5)$$

其中 V_0 為直流電壓成份， ω_1 為基頻角頻率，而 V_h 與 θ_h 分別為第 h 次諧波電壓幅值與諧波電壓相位角。

● 現行管制規範：

較常用於評估諧波污染的指標為總諧波失真(Total harmonic distortion, THD)，其數值可分以下式(1-6)做計算：

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (1-6)$$

其中， V_1 ：為基頻之電壓或電流有效值， h ：整數次諧波， V_h ：為第 h 次諧波有效值。表 1-4 為 IEEE Std. 519-2014 所訂定之電壓諧波規

範，根據共耦合點(Point of Common Coupling, PCC)電壓值的不同，有不同的諧波失真值的限制[26]。

表 1-4、電壓諧波失真值限制

Bus Voltage V at PCC	Individual harmonic(%)	THD(%)
$V \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < V$	1.0	1.5~2.0

而針對我國諧波污染管制，以台電公司之電力系統諧波管制暫行標準為主[27]，此標準適用於共耦合點(PCC)電壓在 3.3 kV~22.8 kV 系統以及共耦合點電壓小於 3.3 kV 之系統，針對用戶注入責任分界點之諧波電流為管制項目，其個別失真率與總諧波失真率之限制規範整理如下表 1-5。

表 1-5、電力系統諧波管制暫行標準

諧波電流失真率(%)限制						
	各次諧波個別值(奇次)					總合諧波
I_{sc}/I_L	< 11	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n$	THD(%)
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20~50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0

50~100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100~1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

其中 I_{sc} ：為用戶責任分界點短路電流， I_L ：為既有用戶取 12 個月最大負載電流平均值，而對於 34.5 kV~161 kV 系統為上述限制值之 50%，而綜合以上諧波限制可歸納出幾個重點如下：

- (1)電壓等級越高之系統，不論諧波電壓或電流，其管制更嚴格。
- (2)諧波電壓較諧波電流之限制更嚴格，其分佈在 1.5%~5%之間。
- (3)諧波電流之管制更為詳細，針對各次諧波有其個別限制。
- (4)非基頻整數倍之諧波成分稱為間諧波，目前未有國家列入管制。

(四) 三相電壓不平衡

● 定義：

平衡的三相供電系統中，各相之電壓大小相等且互差 120 度，而當三相電壓之中發生幅值不相等或相角偏移時，此時則稱為三相不平衡。造成三相電壓不平衡的原因包括輸配電線路系統阻抗不相等、單相或三相負載大小分配不均、相與相之間短路等，當一平衡的三相負載連接到不平衡的供電系統時，將導致負載電流也變得不平衡，導致電能耗損或負載受損等危害。

● 現行管制規範：

根據 IEEE Std.1159-2019 規範針對量測三相不平衡的嚴重程度

[21]，主要有兩項常用指標，分別為電壓不平衡比(Voltage Unbalance Ratio, VUR)與電壓不平衡率(Voltage Unbalance Factor, VUF)，前者直接透過三相電壓大小計算，後者則須藉由相序分析來判斷，而兩者皆以百分比表示，其相關公式分別介紹如下：

(1)電壓不平衡比(VUR)：其定義為三相電壓中與平均電壓的最大偏差值與電壓平均值之比值，如下式(1-7)所示，平均相電壓則如式(1-8)：

$$VUR = \frac{\text{Max}\left[\left|V_a - V_{avg}\right|, \left|V_b - V_{avg}\right|, \left|V_c - V_{avg}\right|\right]}{V_{avg}} \times 100\% \quad (1-7)$$

$$V_{avg} = \frac{V_a + V_b + V_c}{3} \quad (1-8)$$

另外，美國電器製造商協會(National Electrical Manufacturers Association, NEMA)針對電壓不平衡比之定義與上述相同，但在公式計算上採用線間電壓而不是相電壓[28]。

(2) 電壓不平衡率(VUF)：此百分比定義為三相電壓系統中的負序電壓分量與正序電壓分量大小的比值，如下式(1-9)所示：

$$VUF = \frac{V_{neg}}{V_{pos}} \times 100\% \quad (1-9)$$

其中， V_{neg} ：為電壓負序分量， V_{pos} ：為電壓正序分量，此外，三相不平衡根據正序電壓分量的大小，可另外再分為過電壓不平衡(Overvoltage unbalance, OVU)與欠電壓不平衡(Under-voltage

unbalance, UVU)。

目前我國針對三相電壓不平衡並無嚴格規範，僅中華民國國家標準(National Standards of the Republic of China, CNS)提及不論低中高壓系統，其電壓不平衡率(VUF)應小於或等於 2%，因此可參考國際較常採納之三項不平衡管制值並整理如下表 1-6 [29]。

表 1-6、三相電壓不平衡規範

管制標準	電壓不平衡率規範
IEC Standard 61000-2-2	< 2%
IEEE Std.1159-2019	< 5%
ANSI C84.1-2016	< 3%
NEMA MG-1-2016	< 3%

(五) 電力中斷

- 定義：

由 IEEE Std.1159-2019 定義當電源電壓或負載電流在特定時間內下降至 0.1 pu 以下時，稱之為電力中斷，而根據事件持續時間的長短又可細分不同類型的電力中斷，如下表 1-7 所示[21]。造成電力中斷的原因可能是電力公司計畫性的設備維護與施工，也可能是電力系統本身故障、人為操作疏失或天災等外在因素所致。電力中斷會造成設備的瞬間停機，導致設備使用壽命縮短，且若是精密儀器遭遇非計畫性的電力中斷，如半導體製程相關產業，將造成無法估量的損失。

表 1-7、電力中斷定義表

Interruption		
Categories	Typical duration	Typical voltage magnitude
Momentary	0.5 cycles – 3s	< 0.1pu
Temporary	> 3 s – 1 min	< 0.1pu
Long duration	> 1min	0.0pu

我國近年來電力中斷事件層出不窮，依台灣電力公司統計近十年用戶停電時間與次數整理如表 1-8 表示[30]，其中每戶停電時間與每戶停電次數計算方式如下式(1-10)、式(1-11)，重大事件則整理如表 1-9，可看出導致我國電力中斷事件發生的主因為系統備用容量的不足。

$$\text{每戶停電時間} = \frac{\text{台電全年停電時間}}{\text{總用戶數}} \quad (1-10)$$

$$\text{每戶停電次數} = \frac{\text{台電全年停電次數}}{\text{總用戶數}} \quad (1-11)$$

表 1-8、近十年供電可靠度

時間	每戶停電時間(分/戶)	每戶停電次數(次/戶)
101	19.05	0.298
102	18.086	0.264
103	17.496	0.264
104	16.268	0.220
105	16.274	0.208
106	16.898	0.212
107	16.187	0.227
108	16.488	0.209
109	15.931	0.230

表 1-9、近五年重大電力中斷事件

時間	事件原因	影響戶數
2017/08/15	備用容量率不足，大潭電廠六機組跳機	838 萬
2021/05/13	備用容量率不足，興達電廠四部機組跳脫	415 萬
2021/05/17	備用容量率不足，C、D 分區輪流停電	193 萬
2022/03/03	興達電廠開關場發生事故，龍崎超高壓變電造成南機組跳脫	553 萬

● 現行管制規範：

由於電力中斷的電壓幅值始終小於系統額定電壓的 10%，故其嚴重程度的評估指標是以事件的持續時間來做衡量，公營事業系統故障導致的電力中斷，其持續時間通常取決於故障的原因，而負載端在發生電力中斷前，輸配線路上將會出現短暫的電壓驟降，其後才會發生電力中斷。負載端的電力中斷持續時間取決於負載本身之保護裝置的啟動速度與能力，通常非永久性電力中斷事件，保護裝置都將使負載受電力中斷的影響時間限制在 30 個週期內。

針對無預警之電力中斷，各國皆以其各自電業相關法規為電力中斷規範，以我國為例依能源管理法第十九條所述，當電能供應事業發生電源不足，經依約執行用戶臨時性減少用電措施及其他緊急因應措施後，若電源仍不足，為確保供電系統安全，得實施限制用戶用電(限電)，並依缺電量順序及標準累進實施如下表 1-10，國防、交通及其他重要用戶則不受此限制 [31]。

表 1-10、限電標準

契約容量(瓩)	限電標準
> 5000	5%~10%
> 1000 且 < 5000	5%~15%
<1000	實施分區輪流停電，每輪次各五十分鐘

有關針對電力中斷事件之規範與補償條例，本研究整理並歸納出各個國家的幾個共通點如下：

- (1)電力供應與一般商品不同，基於電業經營特性及限制，無法保證永不停電，故各國電業對於因故停、限電所造成之影響，均在相關法令規章中明訂電業不負賠償責任。
- (2)供電契約內容常包含供電方式與品質、供電容量、電價計算方式等，因故需要停止供電時，應照各國規定之時間提前公告並通知用戶。
- (3)各國對於因不可抗力之事故、設備故障運轉等停電造成用戶之不便，皆訂有各自之電費扣減標準。

為了增加系統韌性及整合再生能源，分散式微電網為當前國內外主要採行之解決方案，如加拿大 Charlottetown, Hamilton, Winnipeg, Revelstoke、中國深圳、英國沃金自治市鎮議會、德國索嫩社區、美國聖安娜、日本東田等地[32]-[38]。根據研究顯示，上述系統擾動最嚴重的類型主要為電壓驟降與驟升，往往造成大幅度的停電及經濟損失。依據[39]統計，44.4%的大停電主要來自於天然災害，如圖 1-3 與表 1-11 所示。大部分的電力中斷導致微電網停電或斷開與電網的連接是可以預測的，如果微電網本身俱有很強的韌性，就有可

能做好應對這些的擾動準備。韌性從微電網的角度來看，就是具有適應電網變化的能力，在電力中斷發生後維持供電，並儘快從中斷中恢復[40]。

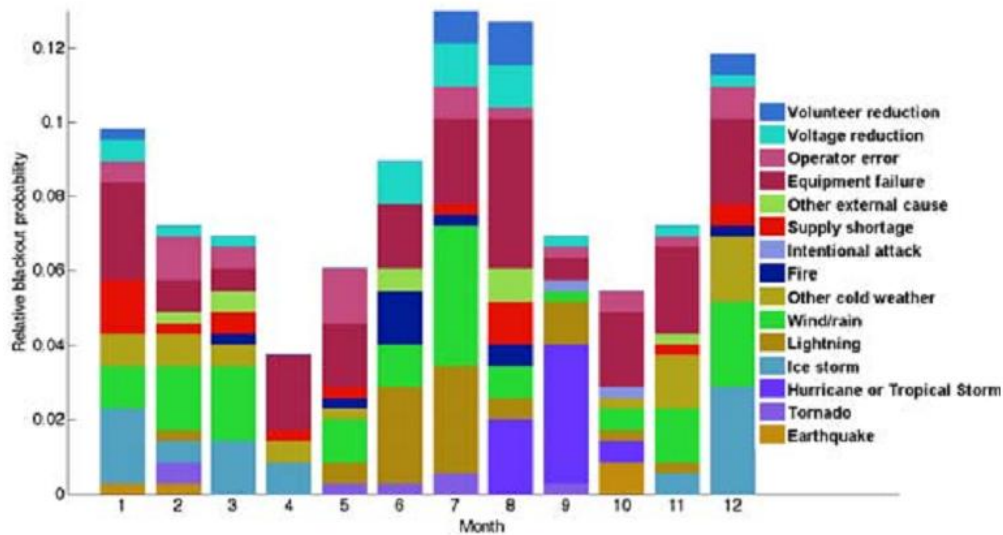


圖 1-3、美國每月平均斷電頻率[39]

表 1-11、造成斷電之事件統計[39]

	% of events	Mean size in MW	Mean size in customers
Earthquake	0.8	1,408	375,900
Tornado	2.8	367	115,439
Hurricane/tropical storm	4.2	1,309	782,695
Ice storm	5.0	1,152	343,448
Lightning	11.3	270	70,944
Wind/rain	14.8	793	185,199
Other cold weather	5.5	542	150,255
Fire	5.2	431	111,244
Intentional attack	1.6	340	24,572
Supply shortage	5.3	341	138,957
Other external cause	4.8	710	246,071
Equipment failure	29.7	379	57,140
Operator error	10.1	489	105,322
Voltage reduction	7.7	153	212,900
Volunteer reduction	5.9	190	134,543

由參考文獻觀察可知，加拿大、中國、英國、德國、美國、日本等國之分散式微電網系統主要面臨之系統重大擾動，主要為不同種類之短路故障，易造成微電網解聯或電力中斷。因此各國在配電等級之微電網除了協助電網提供輔助服務外，亦須規劃微電網本身

之能源配置，以提升微電網之運轉韌性。以當前核研所之微電網系統而言，除了需關注共同耦合點之各項短路故障外，亦須考量微電網本身之韌性提升策略。

二、提出配電網發送至微電網之調度命令與通訊格式規劃

為維持電力供應安全與可靠、確保電力系統穩定、維持電力品質及因應偶發事故，公用售電業向輸配電業購買輔助服務之支出，主要含調頻備轉容量、即時備轉容量、補充備轉容量、全黑啟動及其他(如調整電壓)等服務。其中調頻服務主要因應用電負載量之即時變化性，供電與用電必須隨時保持動態平衡；此備轉容量須於 3 分鐘內反應，且須持續 15 分鐘以上。提供調頻備轉容量之設備需具備自動發電控制 AGC(Automatic Generation Control)或自動頻率控制 AFC(Automatic Frequency Control)能力。而即時備轉服務為因應機組偶發事故後，造成系統電能之暫時性短缺，準備其容量可於短時間內補充系統短缺之電能。即時備轉容量需持續至少 1 小時。例如 2008 年 2 月 26 日，德州電力可靠度委員會為因應負載及風力發電預測失準，負載增加超乎預期及正好碰上機組跳機導致系統頻率下降，立即啟動緊急電力削減計劃，歷時約 3 小時讓系統恢復正常供電。在補充備轉服務方面，為因應系統偶發事故後補充電能短缺，其容量可使電力調度單位重新調整各項備轉容量佈署，恢復系統正常供電能力，以因應系統下次之偶發事故，補充備轉容量須持續至少 2~4 小時。因此，本計畫將分析國際上應用調頻、即時與補充備轉容量的適用案例，以規劃核能研究所微電網參與輔助服務之策略。

輔助服務是屬於一種短時間的備轉容量，在電力系統的穩定上用於即時的電力調度。在不同的電力市場，由於電源結構、電網結

構、負載分布和負載特性的不同，需要的輔助服務種類和數量也不同。在非自由化的市場中，由該調度單位所屬之電業發電機組提供，或由調度單位向可提供輔助服務的業者簽訂雙邊合約，其成本通常隱含在電能價格裡，若是開放電能轉供的區域，則是向轉供的客戶收取相關費用；在自由化電力市場中，頻率控制和備轉容量是建立競爭性電力輔助服務市場之重要因素，其價格是由市場競爭決定的，而無效功率與全黑啟動服務方面則依據系統調節與控制需求而決定是否納入系統中。合理的電力輔助服務價格對於電力市場發展是否健康長遠、電網安全是否穩定健全都有重要的意義。

依據所蒐集到之國際輔助服務之反應速度，歸納如表 2-1 所示[41]。而隨著台灣電力公司於 110 年 7 月進行電力交易平台開始試營運，率先導入日前輔助服務交易，台灣目前輔助服務的運作模式如表 2-2 所示。

表 2-1、國際應用調頻、即時與補充備轉容量方式[41]

備轉容量反應時間	新加坡	愛爾蘭	比利時	美國
調頻備轉	8 秒	5~15 秒	~30 秒	5 秒
即時備轉	30 秒	15~90 秒	30 秒~15 分鐘	10 分鐘
補充備轉	10 分鐘	(1)90 秒~5 分鐘 (2)5~20 分鐘	15 分鐘	30 分鐘

表 2-2、台灣電力公司輔助服務運作模式[42]

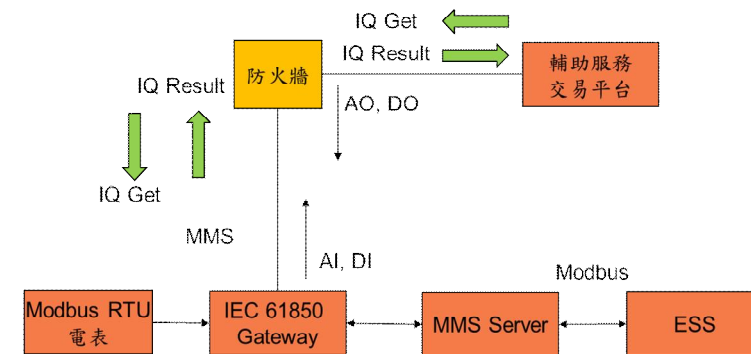
分類	調頻備轉		即時備轉	補充備轉
	dReg	sReg		
目的	因應供電機組跳機、系統負載突增、系統供需預測誤差		因應供電機組跳機、系統負載突增、系統供需預測誤差而衍生之系統供電容量差異	因應系統發生事故失去電源時之事故處理

反應時間	~秒	~1 分鐘	~10 分鐘	~30 分鐘
持續時間	15 分鐘以上	30 分鐘以上	1 小時以上	2~4 小時以上
需求容量	±1300 MW		1000 MW	1000 MW
資源	儲能系統、發電機組 (AGC)		儲能系統、需量反應、自用發電設備、發電機組	需量反應、自用發電設備、發電機組
註：dReg 為動態調頻輔助服務、sReg 為靜態調頻輔助服務。				

表 2-1 中國際應用調頻、即時與補充備轉容量方式，主要是因應供電機組跳機、系統負載突增、系統供需預測誤差、因應系統發生事故失去電源時之事故處理，技術文獻中並無載明如表 2-2 台灣電力公司所述及之應用情境，僅提及透過儲能系統、需量反應、發電機組達成不同響應速度之供需平衡需求。由上述表中資訊可知，因台灣與美國的反應時間規範相同，國際上應用調頻、即時與補充備轉容量的適用案例可參考美國的運轉方式。不過台灣系統與國際運轉方式差異不大，甚至在調頻輔助服務項目規範更詳細，分為 dReg0.25、dReg0.5、sReg，分別進行系統頻率偏移 0.25 Hz、0.5 Hz 情況下的動態調頻與靜態調頻，而台灣電力公司於 110 年 8 月 19 日啟用基準頻率調整，目的為因應電力系統執行不同頻率的運轉操作，新增「接受調度中心指令，調整系統頻率變動輸出或輸入功率曲線基準值」的技術功能需求。此外，未來更規劃新增增強型動態調頻備轉(Enhancement dynamic Regulation, E-dReg)服務，該操作方式以 dReg0.5 為基礎加上尖離峰移轉功能構成的服務，適用對象為併網型儲能，合格交易者需要根據系統頻率以及 E-dReg 充放電指令提供不超過交易容量的 dReg0.5 操作容量與 E-dReg 充放電容量加總。目的為因應 16:00–19:00 系統電能移轉需求，為該時段之能源短缺提供支援，預計 111 年實施。而目前台灣電力輔助服務主要進行

實功率與頻率之調節控制，未來亦將新增虛功率控制。

本計畫主要依據圖 2-1 之通訊架構進行輔助服務調度，以資料流動方向與類型，微電網儲能系統之能源管理伺服器傳遞至台電端之數位及類比資料稱 DI (Digital Input)及 AI (Analog Input)數據；台電端傳遞至微電網儲能系統之數位及類比資料稱 DO (Digital Output)及 AO (Analog Output)數據。而與台電電力交易平台之連線通訊，其中考量電力數據資料(AI)內容較為複雜，故目前電力數據資料(AI)可選擇採用檔案傳輸方式上傳，其餘 DI、DO、AO 資料皆僅能選擇採用 IEC 61850 MMS 方式。若採用 File Transfer 方式上傳之 AI 數據格式，依輔助服務種類不同分別可羅列如圖 2-2 至圖 2-4，其中虛功率控制將於未來啟用。



IQ Get(IEC 61850 Confirmed-Request)、IQ Result(Confirmed-Response)

圖 2-1、輔助服務調度通訊架構

電力數據資料	欄位名稱	資料型態	備註
瞬時 R 相電壓	MMXU.PhV.phsA.cVal.mag.i	string	● 單位為 0.01kV，此欄位須乘上 100 倍再上傳
瞬時 S 相電壓	MMXU.PhV.phsB.cVal.mag.i	string	● 單位為 0.01kV，此欄位須乘上 100 倍再上傳
瞬時 T 相電壓	MMXU.PhV.phsC.cVal.mag.i	string	● 單位為 0.01kV，此欄位須乘上 100 倍再上傳
瞬時 R 相電流	MMXU.A.phsA.cVal.mag.i	string	● 單位為 0.01A，此欄位須乘上 100 倍再上傳
瞬時 S 相電流	MMXU.A.phsB.cVal.mag.i	string	● 單位為 0.01A，此欄位須乘上 100 倍再上傳
瞬時 T 相電流	MMXU.A.phsC.cVal.mag.i	string	● 單位為 0.01A，此欄位須乘上 100 倍再上傳
瞬時系統頻率	MMXU.Hz.mag.i	string	● 單位為 0.01Hz，此欄位須乘上 100 倍再上傳
瞬時輸出/入總實功率	MMXU.TotW.mag.i	string	● 單位為 0.01kW，此欄位須乘上 100 倍再上傳
瞬時總虛功率	MMXU.TotVAr.mag.i	string	● 單位為 0.01kVar，此欄位須乘上 100 倍再上傳
瞬時總功率因數	MMXU.TotPF.mag.i	string	● 單位為 0.01，此欄位須乘上 100 倍再上傳
儲能系統瞬時剩餘電量 SOC	ZBAT.InBatV.mag.i	string	● 單位為 0.01%，此欄位須乘上 100 倍再上傳
儲能系統狀態	ZBAT.BatStstVal	string	● 此欄位值為 0: 無異常，1: 異常
提供該秒資料時間點	GGIO.AnIn2.t	string	● 時區為 UTC ● 時間戳記格式為 yyyy-MM-dd HH:mm:ss.000
備註：			
1 須乘上 100 倍之電力數據資料，乘上倍率前之原數值小數點後三位以後，以無條件捨去方式處理			

圖 2-2、dReg 及 E-dReg 之 AI 資料格式說明[42]

電力數據資料	欄位名稱	資料型態	備註
瞬時 R 相電壓	MMXU.PhV.phsA.cVal.mag.i	string	● 單位為 0.01kV，此欄位須乘上 100 倍再上傳
瞬時 S 相電壓	MMXU.PhV.phsB.cVal.mag.i	string	● 單位為 0.01kV，此欄位須乘上 100 倍再上傳
瞬時 T 相電壓	MMXU.PhV.phsC.cVal.mag.i	string	● 單位為 0.01kV，此欄位須乘上 100 倍再上傳
瞬時 R 相電流	MMXU.A.phsA.cVal.mag.i	string	● 單位為 0.01A，此欄位須乘上 100 倍再上傳
瞬時 S 相電流	MMXU.A.phsB.cVal.mag.i	string	● 單位為 0.01A，此欄位須乘上 100 倍再上傳
瞬時 T 相電流	MMXU.A.phsC.cVal.mag.i	string	● 單位為 0.01A，此欄位須乘上 100 倍再上傳
瞬時系統頻率	MMXU.Hz.mag.i	string	● 單位為 0.01Hz，此欄位須乘上 100 倍再上傳
瞬時輸出/入總實功率	MMXU.TotW.mag.i	string	● 單位為 0.01kW，此欄位須乘上 100 倍再上傳
儲能系統瞬時剩餘電量 SOC	ZBAT.InBatV.mag.i	string	● 單位為 0.01%，此欄位須乘上 100 倍再上傳
儲能系統/發電設備狀態用戶狀態	ZBAT.BatSt.stVal	string	● 此欄位值為 0: 無異常，1: 異常
提供該秒資料時間點	GGIO.AnIn2.t	string	● 時區為 UTC ● 時間戳記格式為 yyyy-MM-dd HH:mm:ss.000
備註：			
1. 須乘上 100 倍之電力數據資料，乘上倍率前之原數值小數點後三位以後，以無條件捨去方式處理			

圖 2-3、sReg 之 AI 資料格式說明[42]

電力數據資料	欄位名稱	資料型態	備註
瞬時輸出/入總實功率	MMXU.TotW.mag.i	string	● 此欄位單位為 0.01kW，此欄位須乘上 100 倍再上傳
瞬時累計輸出/發電電能量	MMTR.SupWh.actVal	string	● 此欄位單位為 0.01kWh，此欄位須乘上 100 倍再上傳 ● 格式為 int64 ● 若交易資源為需量反應者，此欄位為 0 ● 若為自用發電設備者，此欄位填寫「輔助服務及備用容量交易平台管理規範及作業程序」附件五自用發電設備交易資源態樣中，M1 交易表計對電網送電之電能累計量
瞬時累計輸入/用電電能量	MMTR.DmdWh.actVal	string	● 此欄位單位為 0.01kWh，此欄位須乘上 100 倍再上傳 ● 格式為 int64 ● 若交易資源為儲能或發電機，此欄位為 0 ● 若為自用發電設備者，此欄位填寫「電力交易平台管理規範及作業程序」附件五自用發電設備交易資源態樣中，M1 交易表計之電能使用累計量
儲能系統瞬時剩餘電量 SOC/ 自用發電設備 M2 交易表計總實功率	ZBAT.InBatV.mag.i	string	● 若交易資源為儲能設備，則此欄位之單位為 0.01%，此欄位須乘上 100 倍再上傳 ● 若交易資源為自用發電設備者，此欄位填寫「電力交易平台管理規範及作業程序」附件五自用發電設備交易資源態樣中，M2 交易表計之總實功率，單位為 0.01kW，亦即總實功率須乘上 100 倍再上傳
儲能系統/發電設備狀態用戶狀態	ZBAT.BatSt.stVal	string	● 此欄位值為 0: 無異常，1: 異常
提供該分鐘資料時間點	GGIO.AnIn2.t	string	● 時區為 UTC ● 時間戳記格式為 yyyy-MM-dd HH:mm:00.000
備註：			
1. 須乘上 100 倍之電力數據資料，乘上倍率前之原數值小數點後三位以後，以無條件捨去方式處理			

圖 2-4、即時備轉與補充備轉之 AI 資料格式說明[42]

依據輔助服務類型對應之 DI、DO、AO 資料格式則分別如圖 2-5 至 2-7 所示。

輔助服務商品	回覆項目	說明
dReg	履行服務開始	● 合格交易者應於該次(連續)得標小時開始當秒鐘，發送此回覆項目(點位)，將此項目(點位)狀態值設定為 1，用以告知平台該報價代碼履行服務開始，並將該報價代碼之履行服務結束點位復歸，即狀態值設定為 0。 ● 例如：若得標時間為 01:00:00 至 14:00:00，合格交易者應於 01:00:00 發送履行服務開始。 ● 此欄位值為 0：無回覆；1：履行服務開始
	履行服務結束	● 合格交易者應於該次(連續)得標小時結束前 1 秒鐘，發送此回覆項目(點位)，將此項目(點位)狀態值設定為 1，用以告知平台該報價代碼履行服務將結束，並將該報價代碼之履行服務開始點位復歸，即狀態值設定為 0。 ● 例如：若得標時間為 01:00:00 至 14:00:00，合格交易者應於 13:59:59 發送將履行服務結束。 ● 此欄位值為 0：無回覆，1：履行服務結束
	回報接獲頻率基準值移動指令	● 合格交易者應於接獲調度台下達頻率移動命令當秒鐘，發送此回覆項目(點位)，將此項目(點位)狀態值設定為 1，用以告知調度台該報價代碼接獲頻率移動指令回報，並於 2.5 秒後將該點位復歸為 0。 ● 例如：若接獲調度台頻率移動命令時間為 01:30:00，合格交易者應於 01:30:00 發送頻率移動指令接獲回報。 ● 此欄位值為 0：無回覆，1：頻率移動指令接獲回報
E-dReg	履行服務開始	● 合格交易者應於該次(連續)得標小時開始當秒鐘，發送此回覆項目(點位)，將此項目(點位)狀態值設定為 1，用以告知平台該報價代碼履行服務開始，並將該報價代碼之履行服務結束點位復歸，即狀態值設定為 0。 ● 例如：若得標時間為 01:00:00 至 14:00:00，合格交易者應於 01:00:00 發送履行服務開始。

	履行服務結束	- 此欄位值為 0：無回覆；1：履行服務開始 - 合格交易者應於該次(連續)得標小時結束前 1 秒鐘，發送此回覆項目(點位)，將此項目(點位)狀態值設定為 1，用以告知平台該報價代碼履行服務將結束，並將該報價代碼之履行服務開始點位復歸，即狀態值設定為 0。 例如：若得標時間為 01:00:00 至 14:00:00，合格交易者應於 13:59:59 發送將履行服務結束。 - 此欄位值為 0：無回覆；1：履行服務結束
	回報接獲頻率基準值移動指令	- 合格交易者應於接獲調度台下達頻率移動命令當秒鐘，發送此回覆項目(點位)，將此項目(點位)狀態值設定為 1，用以告知調度台該報價代碼接獲頻率移動指令回報，並於 2.5 秒後將該點位復歸為 0。 例如：若接獲調度台頻率移動命令時間為 01:30:00，合格交易者應於 01:30:00 發送頻率移動指令接獲回報。 - 此欄位值為 0：無回覆；1：頻率移動指令接獲回報
	回報接獲充電/放電指令	- 合格交易者應於接獲調度台下達充電/放電命令當秒鐘，發送此回覆項目(點位)，將此項目(點位)狀態值設定為 1，用以告知調度台該報價代碼接獲頻率移動指令回報，並於 2.5 秒後將該點位復歸為 0。 例如：若接獲調度台充電/放電命令時間為 01:30:00，合格交易者應於 01:30:00 發送充電/放電指令接獲回報。 - 此欄位值為 0：無回覆；1：充電/放電指令接獲回報
sReg	履行服務開始	- 合格交易者應於該次(連續)得標小時開始當秒鐘，發送此回覆項目(點位)，將此項目(點位)狀態值設定為 1，用以告知平台該報價代碼履行服務開始，並將該報價代碼之履行服務結束點位復歸，即狀態值設定為 0。 例如：若得標時間為 01:00:00 至 14:00:00，合格交易者應於 01:00:00 發送履行服務開始。 - 此欄位值為 0：無回覆；1：履行服務開始

	履行服務結束	- 合格交易者應於該次(連續)得標小時結束前 1 秒鐘，發送此回覆項目(點位)，將此項目(點位)狀態值設定為 1，用以告知平台該報價代碼履行服務將結束，並將該報價代碼之履行服務開始點位復歸，即狀態值設定為 0。 例如：若得標時間為 01:00:00 至 14:00:00，合格交易者應於 13:59:59 發送將履行服務結束。 - 此欄位值為 0：無回覆；1：履行服務結束
	回報接獲頻率基準值移動指令	- 合格交易者應於接獲調度台下達頻率移動命令當秒鐘，發送此回覆項目(點位)，將此項目(點位)狀態值設定為 1，用以告知調度台該報價代碼接獲頻率移動指令回報，並於 2.5 秒後將該點位復歸為 0。 例如：若接獲調度台頻率移動命令時間為 01:30:00，合格交易者應於 01:30:00 發送頻率移動指令接獲回報。 - 此欄位值為 0：無回覆；1：頻率移動指令接獲回報
	履行待命服務開始	- 合格交易者應於該次(連續)得標小時開始當秒鐘，發送此回覆項目(點位)，將此項目(點位)狀態值設定為 1，用以告知平台該報價代碼履行服務開始，並將該報價代碼之其他回覆項目點位復歸，即狀態值設定為 0。 例如：若得標時間為 01:00:00 至 02:00:00，合格交易者應於 01:00:00 發送履行服務開始。 - 此欄位值為 0：無回覆；1：履行服務開始
即時備轉	履行待命服務結束	- 合格交易者應於該次(連續)得標小時結束前 1 秒鐘，發送此回覆項目(點位)，將此項目(點位)狀態值設定為 1，用以告知平台該報價代碼履行服務將結束，並將該報價代碼之其他回覆項目點位復歸，即狀態值設定為 0。 例如：若得標時間為 01:00:00 至 02:00:00，合格交易者應於 01:59:59 發送將履行服務結束。 - 此欄位值為 0：無回覆；1：履行服務結束
	回報接獲執行指令	合格交易者應於接獲平台調度命令當秒鐘，發送此回覆項目(點位)，將此項目(點位)狀態值設定為 1，用以告知平台該報價代碼接獲執行指令回報，並將該報價代碼之其他回覆項目點位復歸，即狀態值設定為 0。 例如：若接獲平台調度命令時間為 01:30:00，合格交易者應於 01:30:00 發送執行指

		- 令接獲回報。 - 此欄位值為 0：無回覆；1：執行指令接獲回報
	回報接獲結束指令	- 合格交易者應於接獲平台調度命令當秒鐘，發送此回覆項目(點位)，將此項目(點位)狀態值設定為 1，用以告知平台該報價代碼接獲結束指令回報，並將該報價代碼之其他回覆項目點位復歸，即狀態值設定為 0。 例如：若接獲平台結束調度命令時間為 01:30:00，合格交易者應於 01:30:00 發送結束指令接獲回報。 - 此欄位值為 0：無回覆；1：結束指令接獲回報
	回報執行結束	- 合格交易者當達指令服務結束時間(相關說明請見 3.2.4)當秒鐘，發送此回覆項目(點位)，將此項目(點位)狀態值設定為 1，用以告知平台該報價代碼結束當次調度服務，並將該報價代碼之其他回覆項目點位復歸，即狀態值設定為 0。 例如：若服務結束時間(相關說明請見 3.2.4)為 02:00:00，合格交易者應於 02:00:00 發送執行結束回報。 - 此欄位值為 0：無回覆；1：執行結束回報
補充備轉	履行待命服務開始	- 合格交易者應於該次(連續)得標小時開始當秒鐘，發送此回覆項目(點位)，將此項目(點位)狀態值設定為 1，用以告知平台該報價代碼履行服務開始，並將該報價代碼之其他回覆項目點位復歸，即狀態值設定為 0。 例如：若得標時間為 01:00:00 至 03:00:00，合格交易者應於 01:00:00 發送履行服務開始。 - 此欄位值為 0：無回覆；1：履行服務開始
	履行待命服務結束	- 合格交易者應於該次(連續)得標小時結束前 1 秒鐘，發送此回覆項目(點位)，將此項目(點位)狀態值設定為 1，用以告知平台該報價代碼履行服務將結束，並將該報價代碼之其他回覆項目點位復歸，即狀態值設定為 0。 例如：若得標時間為 01:00:00 至 03:00:00，合格交易者應於 02:59:59 發送將履行服務結束。 - 此欄位值為 0：無回覆；1：履行服務結束

	回報接獲執行指令	● 合格交易者應於接獲平台調度命令當秒鐘，發送此回覆項目(點位)，將此項目(點位)狀態值設定為 1，用以告知平台該報價代碼接獲執行指令回報，並將該報價代碼之其他回覆項目點位復歸，即狀態值設定為 0。 例如：若接獲平台調度命令時間為 01:30:00，合格交易者應於 01:30:00 發送執行指令接獲回報。 ● 此欄位值為 0：無回覆，1：執行指令接獲回報
	回報接獲結束指令	● 合格交易者應於接獲平台調度命令當秒鐘，發送此回覆項目(點位)，將此項目(點位)狀態值設定為 1，用以告知平台該報價代碼接獲結束指令回報，並將該報價代碼之其他回覆項目點位復歸，即狀態值設定為 0。 例如：若接獲平台結束調度命令時間為 01:30:00，合格交易者應於 01:30:00 發送結束指令接獲回報。 ● 此欄位值為 0：無回覆，1：結束指令接獲回報
	回報執行結束	● 合格交易者當達指令服務結束時間(相關說明請見 3.2.4)時，發送此回覆項目(點位)，將此項目(點位)狀態值設定為 1，用以告知平台該報價代碼結束當次調度服務，並將該報價代碼之其他回覆項目點位復歸，即狀態值設定為 0。 例如：服務結束時間(相關說明請見 3.2.4)為 03:00:00，合格交易者可於 03:00:00 發送執行結束回報。 ● 合格交易者當達指令服務結束時間(相關說明請見 3.2.4)而仍可持續提供服務者，可逕行持續執行至平台下達結束指令，即行結束當次服務，發送此回覆項目(點位)，將此項目(點位)狀態值設定為 1，用以告知平台該報價代碼結束當次調度服務，並將該報價代碼之其他回覆項目點位復歸，即狀態值設定為 0。 例如：服務結束時間(相關說明請見 3.2.4)為 03:00:00，平台下達結束指令時間為 04:00:00，合格交易者應於 04:00:00 發送執行結束回報 ● 此欄位值為 0：無回覆，1：執行結束回報

圖 2-5、依據輔助服務類型對應之 DI 資料格式說明[42]

輔助服務商品	指令項目	說明
dReg	頻率基準值移動指令	● 調度台下達頻率基準值移動指令予報價代碼，報價代碼需接續回覆接獲頻率基準值移動指令(相關說明請見 3.2.1)。 ● 調度台發送此指令時，亦將同時通知該報價代碼指令頻率移動目標值、指令頻率移動開始時間，報價代碼接獲此指令時，應至 AO(接收平台通知功能)取得相關資訊(相關說明請見 3.2.4)。 ● 此欄位值為 0：未發出指令，1：頻率基準值移動指令
	頻率基準值移動指令	● 調度台下達頻率基準值移動指令予報價代碼，報價代碼需接續回覆接獲頻率基準值移動指令(相關說明請見 3.2.1)。 ● 調度台發送此指令時，亦將同時通知該報價代碼指令頻率移動目標值、指令頻率移動開始時間，報價代碼接獲此指令時，應至 AO(接收平台通知功能)取得相關資訊(相關說明請見 3.2.4)。 ● 此欄位值為 0：未發出指令，1：頻率基準值移動指令
E-dReg	充電/放電指令	● 調度台下達充電/放電指令予報價代碼，報價代碼需接續回覆接獲充電/放電指令(相關說明請見 3.2.1)。 ● 調度台發送此指令時，亦將同時通知該報價代碼電能充/放指令容量、電能充/放開始時間，報價代碼接獲此指令時，應至 AO(接收平台通知功能)取得相關資訊(相關說明請見 3.2.4)。 ● 此欄位值為 0：未發出指令，1：電能充/放指令
	頻率基準值移動指令	● 調度台下達頻率基準值移動指令予報價代碼，報價代碼需接續回覆接獲頻率基準值移動指令(相關說明請見 3.2.1)。 ● 調度台發送此指令時，亦將同時通知該報價代碼頻率基準值移動指令發出時間、指令頻率移動目標值、指令頻率移動開始時間，報價代碼接獲此指令時，應至 AO(接收平台通知功能)取得相關資訊(相關說明請見 3.2.4)。 ● 此欄位值為 0：未發出指令，1：頻率基準值移動指令

	用電量不足	● 若交易資源態樣為需量反應，平台於非事件執行期間，將持續偵測該報價代碼之加總總功率，若加總總功率低於投標容量，平台將發送此通知予該報價代碼。 ● 此欄位值為 0：未發出指令，1：用電量不足
即時備轉	用電量不足 SOC 準備量不足 機組剩餘可用量不足	● 平台於非調度執行期間，將持續偵測該報價代碼之交易資源準備量，當交易資源之用電量不足(需量反應態樣)、SOC 準備量不足(併網型儲能態樣)、機組剩餘可用量不足(發電機組或自用發電設備態樣)時，平台將發送此通知予該報價代碼。 ● 此欄位值為 0：未發出指令，1：用電量不足/SOC 準備量不足/機組剩餘可用量不足，每分鐘偵測及發佈
	啟動指令	● 當電力系統因事故而有即時備轉輔助服務需求時，平台將發送此調度指令予報價代碼，以啟動即時備轉服務，報價代碼需接續回覆執行指令接獲回報(相關說明請見 3.2.1)。 ● 平台發送此調度指令時，亦將同時通知該報價代碼啟動指令發出時間、指令服務開始時間、指令服務結束時間及指令執行容量，報價代碼接獲此啟動指令時，應至 AO(接收平台通知功能)取得相關資訊(相關說明請見 3.2.4)。 ● 此欄位值為 0：未發出指令，1：啟動指令
	結束指令	● 平台得發送此調度指令結束該次調度執行事件，報價代碼需接續回覆結束指令接獲回報(相關說明請見 3.2.1)。 ● 平台得發送此調度指令結束該次調度執行事件，亦將同時通知該報價代碼結束指令發出時間及服務結束時間，報價代碼接獲此結束指令時，應至 AO(接收平台通知功能)取得相關資訊(相關說明請見 3.2.4)。 ● 此欄位值為 0：未發出指令，1：結束指令
補充備轉	用電量不足 SOC 準備量不足 機組剩餘可用量不足	● 平台於非調度執行期間，將持續偵測該報價代碼之交易資源準備量，當交易資源之用電量不足(需量反應態樣)、SOC 準備量不足(併網型儲能態樣)、機組剩餘可用量不足(發電機組或自用發電設備態樣)時，平台將發送此通知予該報價代碼。 ● 此欄位值為 0：未發出指令，1：用電量不足/SOC 準備量不足/機組剩餘可用量不足

	啟動指令	用量不足，每分鐘偵測及發佈 ● 當電力系統因事故而有補充備轉輔助服務需求時，平台將發送此調度指令予報價代碼，以啟動補充備轉服務，報價代碼需接續回覆執行指令接獲回報(相關說明請見 3.2.1)。 ● 平台發送此調度指令時，亦將同時通知該報價代碼啟動指令發出時間、指令服務開始時間、指令服務結束時間及指令執行容量，報價代碼接獲此啟動指令時，應至 AO(接收平台通知功能)取得相關資訊(相關說明請見 3.2.4)。 ● 此欄位值為 0：未發出指令，1：啟動指令
	結束指令	● 平台得發送此調度指令結束該次調度執行事件，報價代碼需接續回覆結束指令接獲回報(相關說明請見 3.2.1)。 ● 平台得發送此調度指令結束該次調度執行事件，亦將同時通知該報價代碼結束指令發出時間及服務結束時間，報價代碼接獲此結束指令時，應至 AO(接收平台通知功能)取得相關資訊(相關說明請見 3.2.4)。 ● 此欄位值為 0：未發出指令，1：結束指令

圖 2-6、依據輔助服務類型對應之 DO 資料格式說明[42]

輔助服務商品	指令項目	說明	備註
dReg	指令頻率移動目標值	調度台於 頻率基準值移動指令 (相關說明請見 3.2.2)發送時，將透過此點位告知此次頻率基準值移動之頻率移動目標值。	● 單位為 0.01Hz ● 乘上 100 倍後發送指令
	指令頻率移動開始時間 (Unix Timestamp-H)	調度台於 頻率基準值移動指令 (相關說明請見 3.2.2)發送時，將透過此點位告知此次頻率基準值移動之開始時間。	● 時間為 UTC ● 時間最小單位為秒 ● 格式為 Unix Timestamp 64bit 高位元
	指令頻率移動開始時間 (Unix Timestamp-L)		● 時間為 UTC ● 時間最小單位為秒 ● 格式為 Unix Timestamp 64bit 低位元
E-dReg	指令頻率移動目標值	調度台於 頻率基準值移動指令 (相關說明請見 3.2.2)發送時，將透過此點位告知此次頻率基準值移動之頻率移動目標值。	● 單位為 0.01Hz ● 乘上 100 倍後發送指令
	指令頻率移動開始時間 (Unix Timestamp-H)	調度台於 頻率基準值移動指令 (相關說明請見 3.2.2)發送時，將透過此點位告知此次頻率基準值移動之開始時間。	● 時間為 UTC ● 時間最小單位為秒 ● 格式為 Unix Timestamp 64bit 高位元
	指令頻率移動開始時間 (Unix Timestamp-L)		● 時間為 UTC ● 時間最小單位為秒 ● 格式為 Unix Timestamp 64bit 低位元

	電能充/放指令容量	調度台於 充電/放電指令 (相關說明請見 3.2.2)發送時，將透過此點位告知此次電能充電/放電指令之充/放電容量。	● 單位為 0.01MW ● 乘上 100 倍後發送指令
	電能充/放開始時間 (Unix Timestamp-H)	調度台於 充電/放電指令 (相關說明請見 3.2.2)發送時，將透過此點位告知此次電能充電/放電指令之開始時間。	● 時間為 UTC ● 時間最小單位為秒 ● 格式為 Unix Timestamp 64bit 高位元
	電能充/放開始時間 (Unix Timestamp-L)		● 時間為 UTC ● 時間最小單位為秒 ● 格式為 Unix Timestamp 64bit 低位元
sReg	指令頻率移動目標值	調度台於 頻率基準值移動指令 (相關說明請見 3.2.2)發送時，將透過此點位告知此次頻率基準值移動之頻率移動目標值。	● 單位為 0.01Hz ● 乘上 100 倍後發送指令
	指令頻率移動開始時間 (Unix Timestamp-H)	調度台於 頻率基準值移動指令 (相關說明請見 3.2.2)發送時，將透過此點位告知此次頻率基準值移動之開始時間。	● 時間為 UTC ● 時間最小單位為秒 ● 格式為 Unix Timestamp 64bit 高位元
	指令頻率移動開始時間 (Unix Timestamp-L)	調度台於 頻率基準值移動指令 (相關說明請見 3.2.2)發送時，將透過此點位告知此次頻率基準值移動之開始時間。	● 時間為 UTC ● 時間最小單位為秒 ● 格式為 Unix Timestamp 64bit 低位元
即時備轉	啟動指令發出時間 (Unix Timestamp-H)	平台於 啟動指令 (相關說明請見 3.2.2)發送時，將透過此點位告知開始此次調度事件之通知時間。	● 時間為 UTC ● 時間最小單位為秒 ● 格式為 Unix Timestamp 64bit 高位元

	啟動指令發出時間 (Unix Timestamp-L)		- 時間為 UTC - 時間最小單位為秒 - 格式為 Unix Timestamp 64bit 低位元
	指令服務開始時間 (Unix Timestamp-H)	平台於 啟動指令 (相關說明請見 3.2.2)發送時，將透過此點位告知此次調度事件之執行開始時間，此時間即為正式計算執行率之起始時間。	- 時間為 UTC - 時間最小單位為秒 - 格式為 Unix Timestamp 64bit 高位元
	指令服務開始時間 (Unix Timestamp-L)		- 時間為 UTC - 時間最小單位為秒 - 格式為 Unix Timestamp 64bit 低位元
	指令執行容量	平台於 啟動指令 (相關說明請見 3.2.2)發送時，將透過此點位告知此次調度事件之執行容量。	- 單位為 0.01MW - 乘上 100 倍後發送指令
	結束指令發出時間 (Unix Timestamp-H)	平台於 結束指令 (相關說明請見 3.2.2)發送時，將透過此點位告知結束此次調度事件之通知時間。	- 時間為 UTC - 時間最小單位為秒 - 格式為 Unix Timestamp 64bit 高位元
	結束指令發出時間 (Unix Timestamp-L)		- 時間為 UTC - 時間最小單位為秒 - 格式為 Unix Timestamp 64bit 低位元
	指令服務結束時間 (Unix Timestamp-H)	平台於 啟動指令 或 結束指令 (相關說明請見 3.2.2)發送時，將透過此點位告知此次調度事件之執行結束時間，此時間即為結束計算執行率之時間。	- 時間為 UTC - 時間最小單位為秒 - 格式為 Unix Timestamp 64bit 高位元
	指令服務結束時間 (Unix Timestamp-L)		- 時間為 UTC - 時間最小單位為秒 - 格式為 Unix Timestamp 64bit 低位元
補充備轉	啟動指令發出時間 (Unix Timestamp-H)	平台於 啟動指令 (相關說明請見 3.2.2)發送前，將透過此點位預先告知開始此次調度事件之通知時間。	- 時間為 UTC - 時間最小單位為秒 - 格式為 Unix Timestamp 64bit 高位元
	啟動指令發出時間 (Unix Timestamp-L)		- 時間為 UTC - 時間最小單位為秒 - 格式為 Unix Timestamp 64bit 低位元
	指令服務開始時間 (Unix Timestamp-H)	平台於 啟動指令 (相關說明請見 3.2.2)發送前，將透過此點位預先告知此次調度事件之執行時間(正式計算費用之時間)。	- 時間為 UTC - 時間最小單位為秒 - 格式為 Unix Timestamp 64bit 高位元
	指令服務開始時間 (Unix Timestamp-L)		- 時間為 UTC - 時間最小單位為秒 - 格式為 Unix Timestamp 64bit 低位元
	指令執行容量	平台於 啟動指令 (相關說明請見 3.2.2)發送前，將透過此點位預先告知此次調度事件之執行容量。	- 單位為 0.01MW - 乘上 100 倍後發送指令
	結束指令發出時間 (Unix Timestamp-H)	平台於 結束指令 (相關說明請見 3.2.2)發送前，將透過此點位預先告知結束此次調度事件之通知時間。	- 時間為 UTC - 時間最小單位為秒 - 格式為 Unix Timestamp 64bit 高位元
	結束指令發出時間 (Unix Timestamp-L)		- 時間為 UTC - 時間最小單位為秒 - 格式為 Unix Timestamp 64bit 低位元
	指令服務結束時間 (Unix Timestamp-H)	平台於 啟動指令 或 結束指令 (相關說明請見 3.2.2)發送時，將透過此點位告知此次調度事件之執行結束時間，此時間即為結束計算執行率之時間。	- 時間為 UTC - 時間最小單位為秒 - 格式為 Unix Timestamp 64bit 高位元
	指令服務結束時間 (Unix Timestamp-L)		- 時間為 UTC - 時間最小單位為秒 - 格式為 Unix Timestamp 64bit 低位元

圖 2-7、依據輔助服務類型對應之 AO 資料格式說明[42]

非操作於輔助模式時，配電網發送至微電網之調度命令主要依據併網模式與孤島模式進行操作，然而當遭遇不同擾動與系統故障時，微電網之儲能系統需進行電力品質調節以維持系統之穩定，因

此本計畫於下一節發展漸進式輔助電力調控策略，以因應各種擾動情況下系統之電力控制。

三、探討配電系統受再生能源等不同擾動與系統故障時，提出微電網分散式電源之漸進式輔助調控策略邏輯

(一) 系統簡介

功率調節系統(Power Conditioning System, PCS)常並聯於分散式發電系統(Distributed Generation system, DGs)與負載之間，藉由逆變器控制策略，根據不同情境調節實虛功率的輸出與輸入，以分擔或穩定負載，並維持功率調節系統本身直流源的穩定。本文提出一多模式功率調節系統架構，當負載處於正常供電狀態時，系統以並聯形式供給負載所需之部分功率，而當輸配線路發生電力品質事件時，系統以串聯形式注入補償電壓以減輕負載受電力事件的影響，此外當發生電力中斷情況時，系統也可作為備用電源持續發電以維持負載正常運作。

(二) 系統硬體架構

本計畫所提之多模式漸進式輔助電力調節系統其硬體架構如下圖 3-1 所示，其組成分別介紹如下：

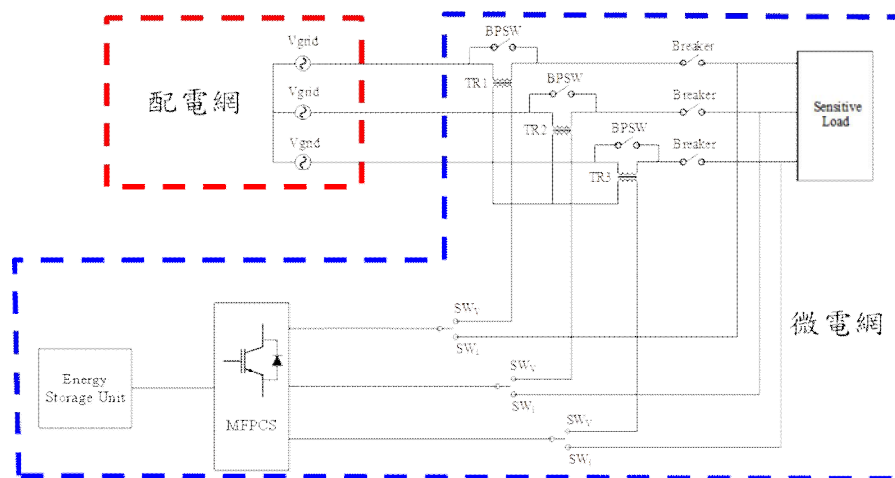


圖 3-1、多模式漸進式輔助電力調節系統架構圖

➤ **直流儲能元件：**

儲能元件提供功率調節系統輸出所需之電能，同時也是系統向輸電線路注入之補償電壓的來源，儲能元件常具有電池能量儲存系統(Battery Energy Storage System, BESS)做為介面控制。另外，不同的儲能元件具有不同充放電特性，本文選擇以鋰電池作為直流儲能元件，因其具有能量密度高、充放電速度快、價格低廉等優勢。

➤ **雙向直流-直流轉換器：**

直流測儲能元件提供恆定的直流電壓，而直流-直流轉換器能夠降低直流鏈電壓的擾動，使功率調節系統在不同的情境下，維持輸出功率的穩定。本文選擇雙向架構之直流-直流升壓轉換器，除了能使直流鏈穩定在所需的電壓等級，也能使鋰電池保持良好的充放電響應。

➤ **電壓源逆變器：**

電壓源逆變器藉由不同的開關切換技術，將直流電壓轉換為線路所需的三相交流電壓，透過不同的演算法可以輸出所需的電壓電流大小、相位、頻率。本文選擇常見之三相三線電壓源逆變器，因其架構簡單且廣泛應用於大部分電力系統之中。

➤ **低通濾波器：**

由於電壓源逆變器的輸出電壓與電流內常具有高頻諧波成分，因此需藉由低通濾波器將其濾除，以避免系統輸出之電壓或電流汙

染電網。本文透過設計 RLC 二階濾波器，可有效抑制逆變器輸出電壓的諧波成分，使系統不論在供給負載功率或輸出補償電壓時都能維持良好的電力品質。

➤ 串聯式注入變壓器：

串聯式注入變壓器採用高壓繞組將本文之多模式功率調節系統架構與輸配電線路做連接，使系統在補償模式下得以注入補償電壓。變壓器一次側連接輸配電線路，二次側則連接電壓源逆變器輸出電壓，另外變壓器的兩側完全絕緣，使得系統於正常供電的情況下，可與輸配電線路達到電氣隔離的效果。

➤ 切換開關：

切換開關常做為保護裝置或線路切換元件應用於電力系統中，本文提出之多模式功率調節系統架構分別使用旁路開關(By-Pass Switch)、斷路開關(Breaker)與雙向開關(Bidirectional Switch)。旁路開關於電力系統正常供電情況下，可避免串連式注入變壓器影響系統對負載供電，斷路開關則可在電力中斷事件發生時啟動以保護負載，雙向開關則根據有無電力品質事件切換多模式漸進式輔助電力調節系統工作於正常模式與電壓補償模式之間。

(三) 多模式漸進式輔助電力調節系統工作原理

本節分別敘述所提出之多模式漸進式輔助電力調節系統其操作在功率調節模式(併網與輔助服務模式)、電壓補償模式(電力品質調

節模式)與不斷電系統模式(孤島模式)時的工作原理與開關切換狀態。

1. 功率調節系統

功率調節系統之架構為一雙向電力轉換器，可進行交直流轉換控制及直流端儲能元件的充放電過程，並具有併網與離網之功能，市售常見之功率調節系統常與電池儲能系統(BESS)、能源管理系統(Energy Management System, EMS)做結合，有著高功率轉換與低功耗的系統特性，可實現微電網之削峰填谷、負載轉移與緊急備用電源等作用。現今以分散式發電系統(DGs)組成之微電網以再生能源作為主要電源，藉由靠近用戶端以減少電力輸送過程中的電能損失，但其間歇性與不穩定性之問題仍需由功率調節系統解決，常見之功率調節系統應用架構如下圖 3-2 所示，透過偵測微電網之用電情形，使分散式發電系統可達成供電平滑化並提高其供電可靠度。

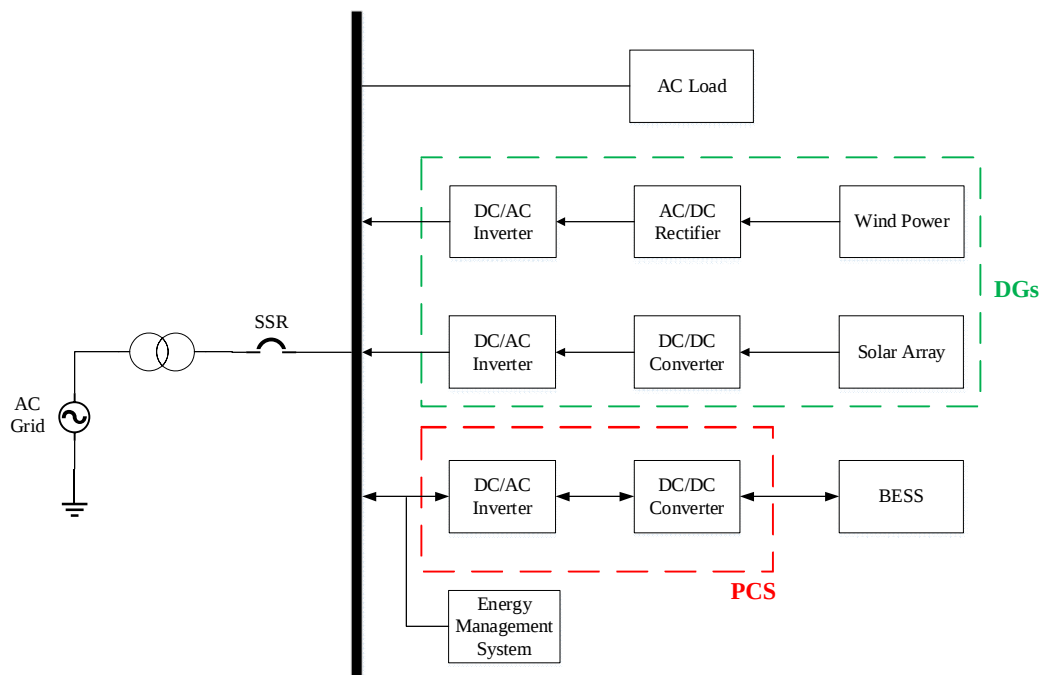


圖 3-2、常見之功率調節系統應用架構

2. 電壓補償工作原理

如下圖 3-3 所示，首先透過電壓感測器偵測並獲取電源端之電壓資訊，當電壓並超過規範值時即判定發生電力品質事件，多模式功率調節系統透過開關切換與輸配電線路串聯，進入補償模式。補償模式下，由獲取之電源端電壓值與參考值做計算以產生補償電壓訊號命令，再透過本文所使用之演算法以及適當的補償策略輸出控制訊號至多模式功率調節系統內部的電壓源逆變器進行開關控制，最後透過變壓器將輸出補償電壓以二次側串聯形式注入輸配電線路，完成負載電壓補償工作，此法因持續監控電源端電壓故有著即時性補償的特點。

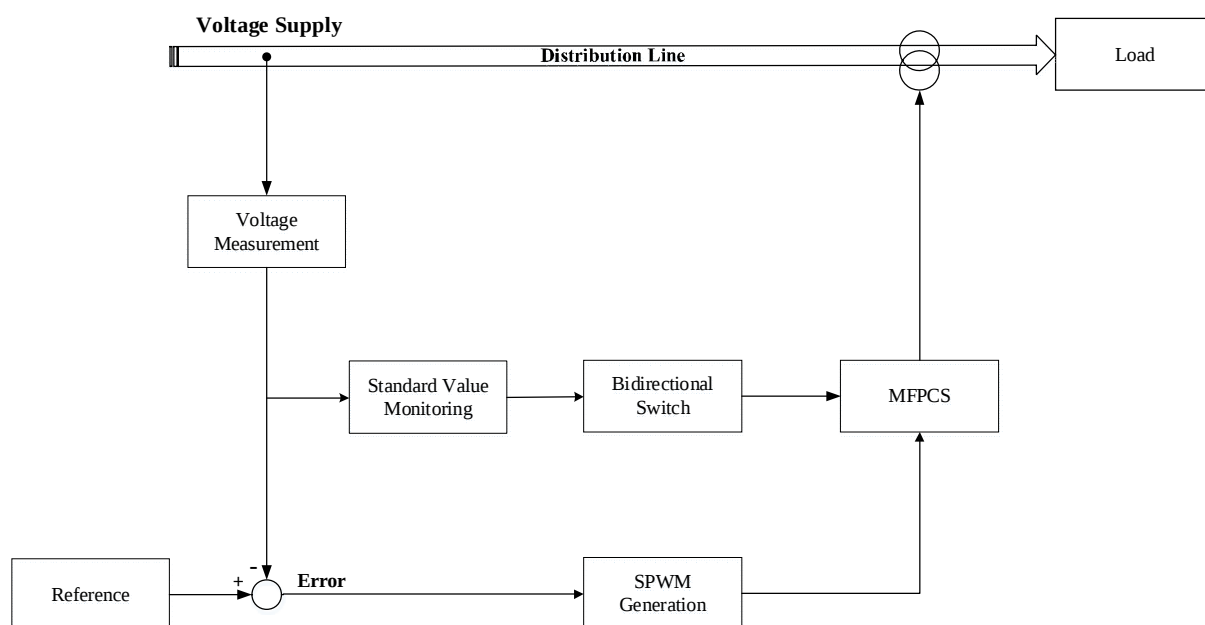


圖 3-3、電壓補償工作原理

3. 本文系統模式與工作原理

本文所提出之多模式漸進式輔助電力調節系統與配電線路之連接方式如下圖 3-4 所示，與一般功率調節系統的主要差異為本文提出之多模式功率調節系統可根據電源端當前的電力品質狀況改變與輸配電線路的連接方式，藉由雙向開關 SW_i 、 SW_v 的切換實現系統與線路的並聯或串聯，同時依照控制判斷流程切換系統演算法使其工作在不同的模式。

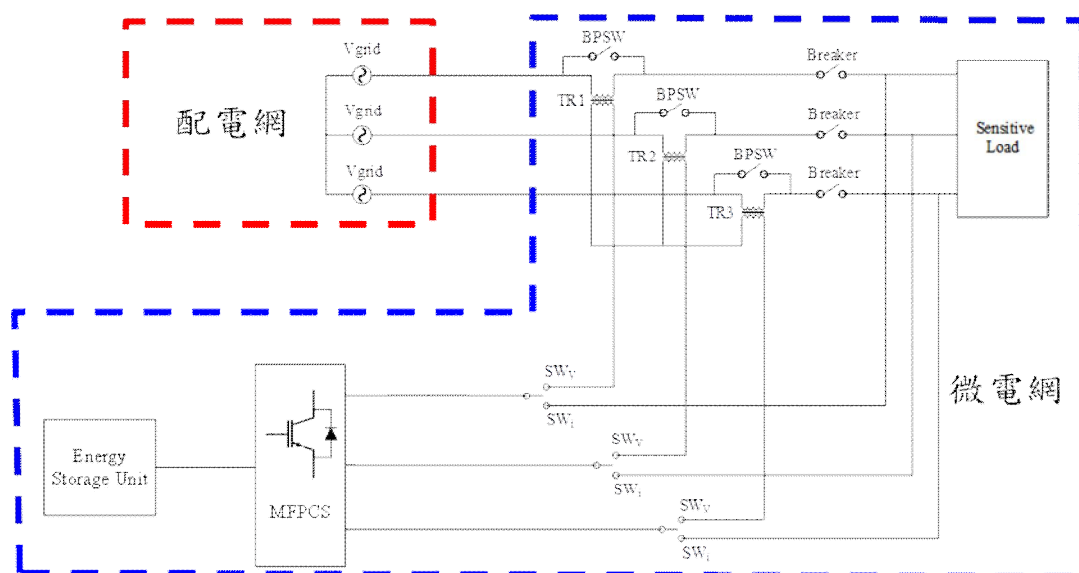


圖 3-4、多模式漸進式輔助電力調節系統線路連接圖

本文所提出之多模式漸進式輔助電力調節系統其操作模式與對應之開關切換狀態如下表 3-1 所示。當電源端處於正常供電狀態時，系統與輸配電線路以並聯形式連接並操作在一般的功率調節模式，將儲能元件供給之直流電透過功率控制法輸出所需功率，以分擔微電網部分電力供給，此時串聯注入變壓器之旁路開關(By-Pass Switch,

BPSW)閉合使變壓器不影響負載接收功率。

而當電源端發生故障或電力品質事件並超過規範值時，雙向開關接收切換命令使系統與輸配電線路以串聯形式連接並操作在電壓補償模式，此時旁路開關(BPSW)將開啟以利儲能元件將供給之直流電透過電壓補償控制法向負載注入補償電壓，以降低大部分電力品質事件對負載造成的影響。最後，當電源端發生電力中斷事件時，輸配電線路上之斷路器(Breaker)將會跳脫使負載切離主電網，此時多模式功率調節系統以並聯形式連接並操作在不斷電系統模式，儲能元件供給之直流電由電壓控制法提供負載所需之電力。

表 3-1、多模式漸進式輔助電力調節系統操作模式與開關狀態

模式	連接配置	開關狀態			功能
		BPSW	SW _i	SW _v	
功率調節模式	並聯	On	On	Off	負載功率調節
電壓補償模式	串聯	Off	Off	On	電力品質事件補償
不斷電系統模式	並聯	On	On	Off	不斷電系統

(四) 補償策略

系統的電壓補償策略選擇常取決於電力事件的類型、系統輸出之額定功率、負載條件等，敏感性負載不論電壓大小或相位的擾動皆會受到影響，部分負載則不受這些條件影響。而電力電子技術發

展至今共有三種常用之電壓補償策略[43]，本節將分別介紹此三種常用之電壓補償策略。

1. 驟降前補償(Pre-sag Compensation)

此法為最泛用之補償方法，可將負載端之電壓大小與電壓相位回復至驟降前的狀態，負載不會感受到失真現象，因此最適合用於敏感性類型之負載。此法之缺點為所注入之補償電壓大小同時取決於電源端電壓驟降大小與相位，補償時需注入大量實功因此需要較大容量之直流源以維持直流鏈電壓之穩定，否則將影響其補償持續時間與補償品質。驟降前補償法其注入之補償電壓大小 V_{Inj} 計算如下式(3-1)，

$$V_{Inj} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{(V_L)^2 + (V_{Sag})^2 - 2 \cdot V_L \cdot V_{Sag} \cdot \cos(\varphi - \delta)} \quad (3-1)$$

補償電壓相角 θ_{Inj} 計算則如下式(3-2)，而所需注入之實功率 P_{Inj} 計算則依式(3-3)。

$$\theta_{Inj} = \tan^{-1} \left[\frac{V_L \cdot \sin(\varphi) - V_{Sag} \cdot \sin(\varphi - \delta)}{V_L \cdot \cos(\varphi) - V_{Sag} \cdot \cos(\varphi - \delta)} \right] \quad (3-2)$$

$$P_{Inj} = \left[3 \cdot \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos(\varphi) - \sum_{k=a,b,c} V_{Sag,k} \cdot I_L \cdot \cos(\varphi - \delta_k) \right] \quad (3-3)$$

其中 V_{Grid} 為電源端電壓， V_L 為負載端相電壓， I_L 為負載端相電流， V_L' 為補償後負載端相電壓， V_{Sag} 為驟降後之電網端相電壓，相角 δ 為驟降前與驟降後電壓相角差，相角 φ 為補償後之負載電壓與負載

電流相角差，驟降前補償策略之相位圖如下圖 3-5 所示。

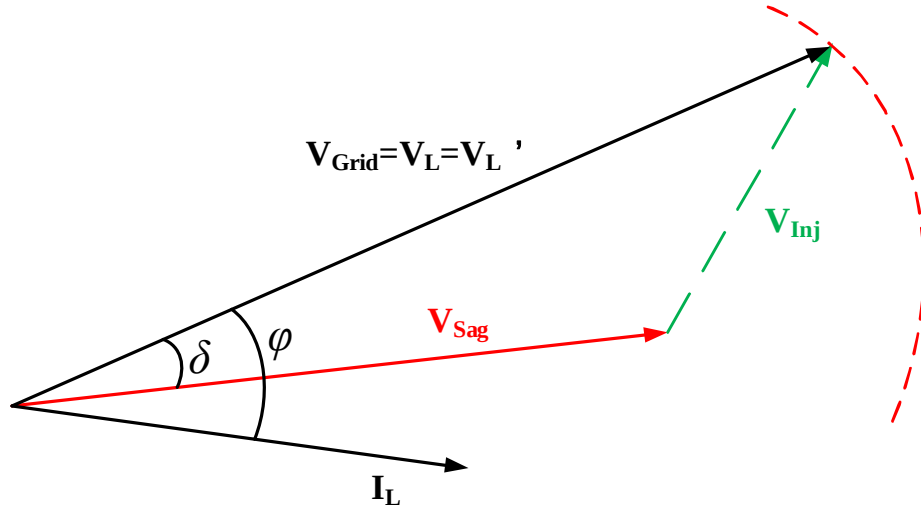


圖 3-5、驟降前補償相位圖

2. 同相位補償(In-phase Compensation)

同相位補償法為最直接之補償方法，其補償電壓與電源端電壓相位相同，因此只能補償負載電壓大小，此法主要用於線性負載，不適合會產生相位跳動之非線性負載採用。同相位補償策略之優點為比起其他補償策略，此方法所注入之實功率較低，直流鏈電壓所需之額定容量也較低。

同相位補償法因其只補償電壓大小故不需計算補償電壓相位，而其注入補償電壓大小 V_{Inj} 計算如下式(3-4)：

$$V_{Inj} = \sqrt{2} \cdot |V_L - V_{Sag}| \quad (3-4)$$

另外，同相位補償法於補償過程也須注入實功 P_{Inj} 至輸配電線路，而其計算方法依下式(3-5)，同相位補償策略之相位圖則如圖 3-6 所

示。

$$P_{Inj} = \left[3 \cdot \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos(\varphi) - \sum_{k=a,b,c} V_{Sag,k} \cdot I_L \cdot \cos(\varphi) \right] \quad (3-5)$$

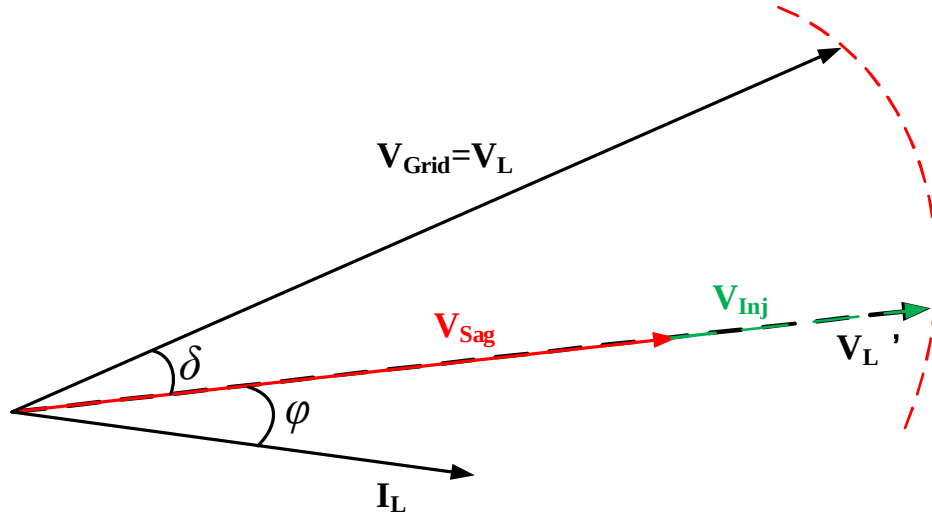


圖 3-6、同相位補償相位圖

3. 能量最小化補償(Energy Minimized Compensation)

能量最小化補償法之相位圖如圖 3-7 所示，此法於補償過程中不向輸配電線路注入實功，而是向線路吸收或注入虛功以盡可能補償電力事件產生的影響，其補償電壓與負載端電流垂直。能量最小化補償法的優點為幾乎不需任何實功率注入，故可以有較長的補償時間，但其缺點是在補償過程會使負載出現相位跳動，所以不適合用於非線性與敏感性負載，且僅能針對輕微的電力事件進行補償，適用範圍受到較多限制。

能量最小化補償法若系統注入實功要為零，需先滿足下式 (3-6) 之條件，系統注入實功率才可滿足式(3-7)：

$$V_L \cdot \cos(\varphi) \leq V_{Sag} \quad (3-6)$$

$$P_{Inj} = 3 \cdot \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos(\varphi) - 3 \cdot \sqrt{3} \cdot V_{Sag} \cdot I_L \cdot \cos(\varphi - \alpha - \delta) = 0 \quad (3-7)$$

其中相位角 α 為補償前與補償後負載端電壓相角差，相位角 α 之計算方式如下式(3-8)：

$$\alpha = \varphi - \delta - \cos^{-1} \left[\frac{V_L \cdot \cos(\varphi)}{V_{Sag}} \right] \quad (3-8)$$

而能量最小化補償法之補償電壓大小與相角之計算則如式(3-9)與式(3-10)：

$$V_{Inj} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{(V_L)^2 + (V_{Sag})^2 - 2 \cdot V_L \cdot V_{Sag} \cdot \cos(\delta + \alpha)} \quad (3-9)$$

$$\theta_{Inj} = \alpha + \frac{\pi}{2} \quad (3-10)$$

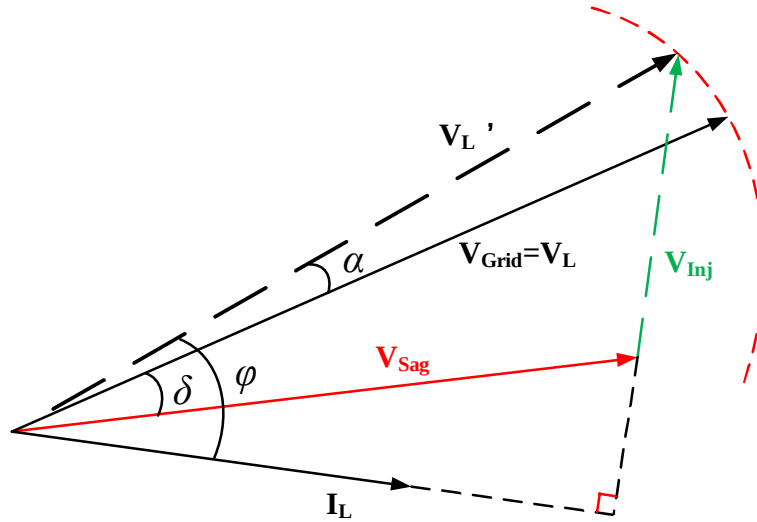


圖 3-7、能量最小化補償相位圖

由上述之三種補償策略可知，驟降前補償法最適用於各種條件之負載以及各類型之電力事件，因此本文提出之多模式漸進式輔助

電力調節系統操作於補償模式時選擇此方法做為補償策略。

(五) 電壓相位偵測技術

對於多模式功率調節系統而言，不論操作在何種模式下，首先都必須取得正確的三相電壓資訊，尤其在不同的情境下電壓相位容易產生跳動的情形，此時透過電壓相位偵測技術取得正確的電壓相位，再結合適當的控制方法才能使系統在不同的條件情況下依然維持正常的工作狀態。

1. 同步參考座標鎖相迴路

本文所提出之多模式功率調節系統，在功率調節模式或電壓補償模式都希望能得到快速穩態的效果，因此將偵測到之電壓資訊透過克拉克轉換(Clark's Transform)和帕克轉換(Park's Transform)減少控制變數進而簡化系統分析與計算的時間，三相電壓座標轉換的方式為先將 abc 三相座標透過下式(3-11)之克拉克轉換至 $\alpha\beta$ 靜止座標，再由下式(3-12)之帕克轉換轉換至 dq 旋轉座標上。

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} = [T_{\alpha\beta}] V_{abc} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = [T_{dq}] V_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & -\cos(\omega t) & 0 \\ \cos(\omega t) & \sin(\omega t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (3-12)$$

而針對電壓相位偵測與分析方法，最常使用之方式為同步參考框鎖相迴路 (Synchronous Reference Frame Phase Lock Loop, SRF-PLL) 因此法架構簡單易實現，且對於一般常見之平衡性負載與電力事件皆能夠準確估測其電源端電壓相位，以達到鎖相之目的。同步參考框鎖相迴路首先運用前述之克拉克轉換與帕克轉換將三相電壓轉換成 dq 直流值，再將 q 軸訊號送入 PI 控制器並經由積分器後獲得估測相角，最後透過回授方式將估測之相角經由帕克轉換形成閉迴路之控制，當 q 軸訊號為零時即達到相位同步，有關同步參考框鎖相迴路之運作原理圖如圖 3-8。

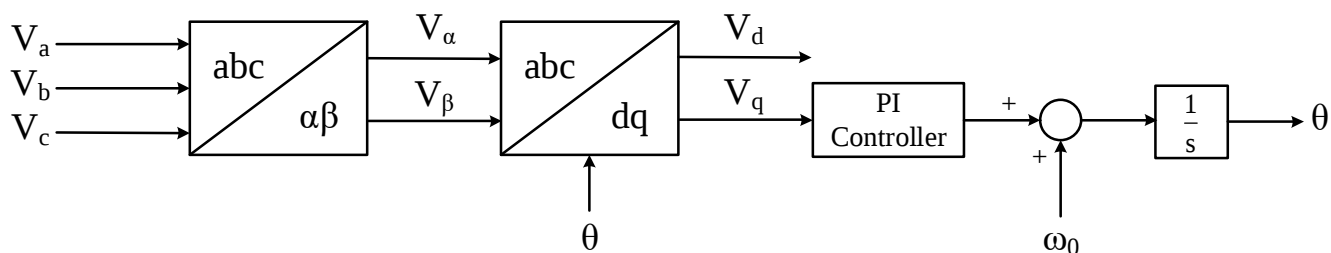


圖 3-8、同步參考框鎖相迴路原理圖

2. 電網電壓相序分析

如 3-5-1 節介紹之同步參考框鎖相迴路 (SRF-PLL) 雖為常用之相位偵測方法，但其僅限於針對三相平衡之電力系統使用，當輸入之三相電壓為不平衡狀況時，同步旋轉座標軸將會產生震盪，變為帶有兩倍基頻弦波之直流訊號，使得相位預測上發生錯誤。因此需先透過電源端電壓相序分析將不平衡成分拆解為正序、負序及零序之

對稱成分。

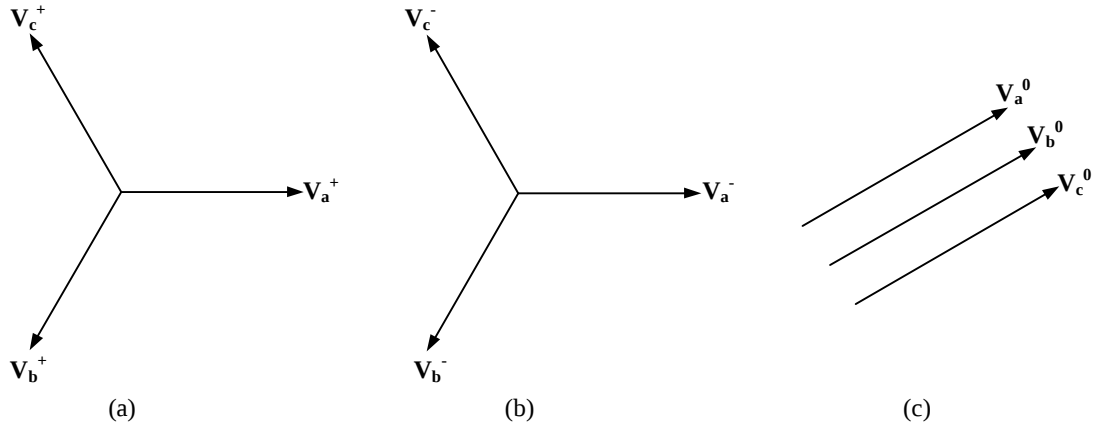


圖 3-9、電壓相序成分：(a)正序 (b)負序 (c)零序

如圖 3-9 所示，三相不平衡之電力系統可從中分解出三種平衡成分如下：

(1)圖 3-9(a)正序成分為三個大小相等、相位相差 120 度且呈 abc 相序排列之相量。

(2)圖 3-9(b)負序成分為三個大小相等、相位相差 120 度且呈 acb 相序排列之相量。

(3)圖 3-9(c)零序成分為三個大小相等且相位相同之相量。

因平衡之電力系統其負相序與零相序電壓分量為零，故分析時以取得電壓正相序分量(Positive Phase Sequence)資訊為主，透過 Lyon[44]提出之順時對稱分量分析法，其其正相序相量 abc 可表示如下：

$$V_a^+ = |V_a^+| \angle 0^\circ = V_a^+$$

$$V_b^+ = |V_a^+| \angle -120^\circ = a^2 V_a^+ \quad (3-13)$$

$$V_c^+ = |V_a^+| \angle 120^\circ = a V_a^+$$

其中 $a = 1 \angle 120^\circ = e^{j\frac{2}{3}\pi}$ ，且 $1+a+a^2=0$ ，並可以此得到一三相電壓正相序轉換矩陣如下(3-14)：

$$[T^+] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ a^2 & 1 & a \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-14)$$

利用式(3-14)搭配前述之克拉克轉換將電壓正相序分量利用座標轉換至 $\alpha\beta$ 座標上，可以下式(3-15)表示：

$$V_{\alpha\beta}^+ = [T_{\alpha\beta}] [T^+] [T_{\alpha\beta}]^T V_{abc} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -q \\ q & 1 \end{bmatrix} \quad (3-15)$$

其中， $q = e^{-j\frac{\pi}{2}}$ 代表與原訊號正交且在時域上相位延遲 90° 之運算單元。

3. 雙二階廣義積分演算法

為了實現上節中式(3-15)之演算法，本文透過使用雙二階廣義積分器正交訊號產生器 (Dual Second Order Generalized Integrator Quadrature Signal Generator, DSOGI-QSG) 以產生一組與原訊號正交的訊號運算，其架構如下圖 3-10 所示：

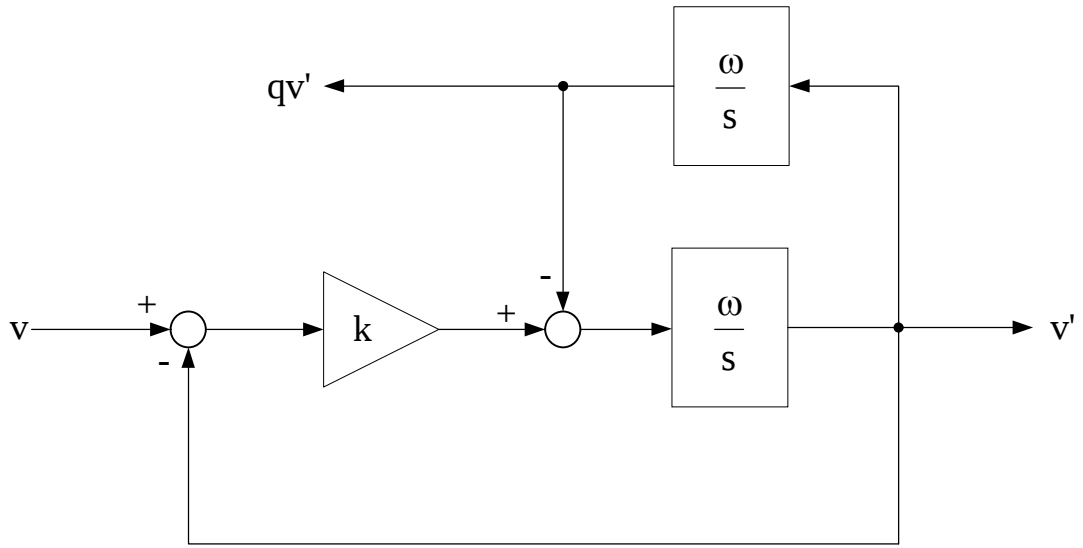


圖 3-10、雙二階廣義階積分器正交訊號產生器架構圖

圖中之 ω 和 k 分別為系統之共振頻率與阻尼係數，而此架構之兩個輸出訊號 v' 和 qv' 則為滿足式(3-15)之相位互差 90° 之電壓訊號。其中，輸出訊號 v' 與輸入訊號 v 可以式(3-16)之轉移函數 $D(s)$ 表示，可看出轉移函數具有帶通濾波器的效果，而輸出訊號 qv' 和輸入訊號可以式(3-17)之轉移函數 $Q(s)$ 表示，可看出此轉移函數具有低通濾波器的效果。

$$D(s) = \frac{v'}{v} = \frac{k\omega s}{s^2 + k\omega s + \omega^2} \quad (3-16)$$

$$Q(s) = \frac{qv'}{v} = \frac{k\omega^2}{s^2 + k\omega s + \omega^2} \quad (3-17)$$

本文利用雙二階廣義積分器正交訊號產生器(DSOGI-QSG)得到之兩個輸出訊號 v' 與 qv' ，搭配式(3-15)取得三相電壓之正相序分量於 $\alpha\beta$ 座標之資訊，再透過前述之帕克轉換公式(3-18)得到 dq 軸之正相

序，最後搭配同步參考框鎖相迴路(SRF-PLL)即可達成發生不平衡事件時，仍能正確估測電源端電壓相位的效果，有關雙二階廣義積分鎖相迴路(DSOGI-PLL)之概念如圖 3-11 所示。

$$\begin{bmatrix} V_d^+ \\ V_q^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & -\cos(\omega t) \\ \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha^+ \\ V_\beta^+ \end{bmatrix} \quad (3-18)$$

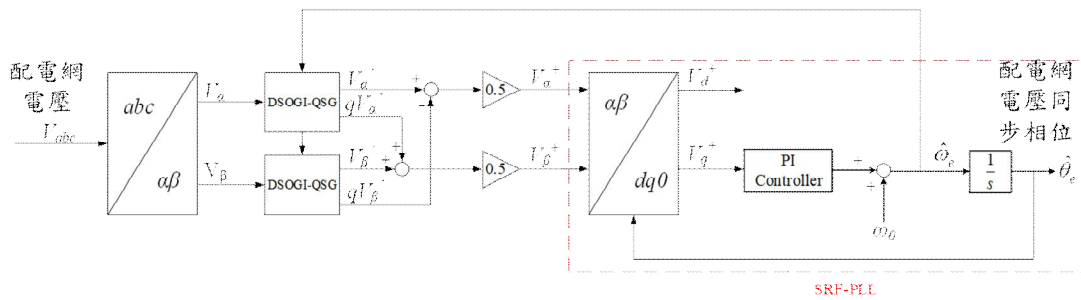


圖 3-11、雙二階廣義積分鎖相迴路概念圖

(六) 控制策略與方法

本節針對所提出之多模式功率調節系統工作在不同模式時之控制策略進行介紹，並說明系統如何依據電力系統在不同狀況下選擇模式切換流程。

1. 直流鏈電壓控制

多模式功率調節系統不論操作在何種模式下，系統皆需要維持儲能元件提供之直流鏈電壓的穩定，以便在任何情況下都能向輸配電線路或負載端提供所需之功率與電壓，有關直流鏈電壓控制架構與其方法如下圖 3-12 所示。

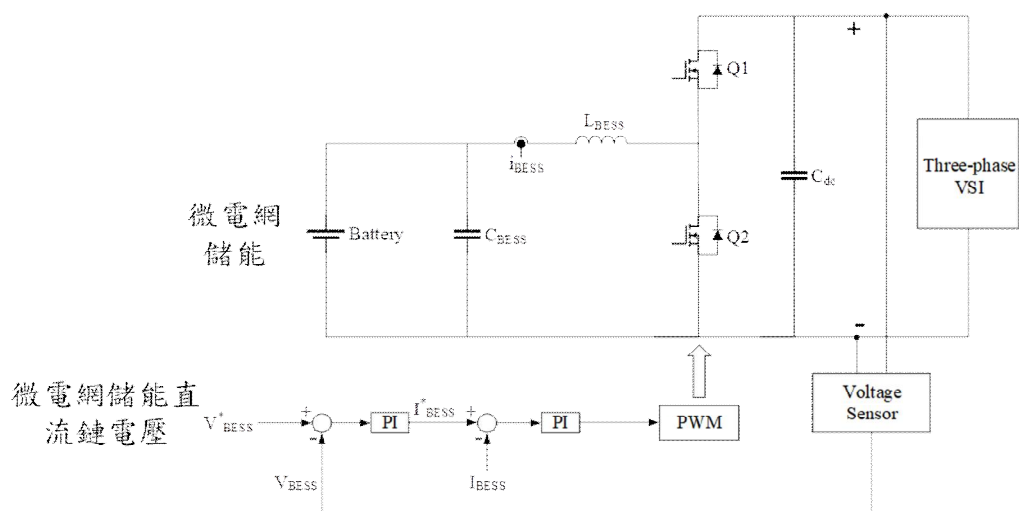


圖 3-12、直流鏈電壓控制圖

本文使用一雙向直流-直流升壓轉換器(Bidirectional DC-DC Boost Converter)，透過傳統 PI 控制器進行控制，使直流鏈電壓能保持在所需之參考值。此外，雙向轉換器的架構使儲能元件能依照當前之電量狀態(State of charge, SOC)切換其充放電情形，使系統操作在功率調節模式時能在微電網中達成削峰填谷的作用。

2. 功率調節模式控制

當電力系統處於正常供電狀態時，本文之系統將工作在功率調節模式，此時系統與輸配電線路以並聯形式連接，此模式向負載端輸出額定之實虛功率，以減輕微電網負擔並維持負載穩定，此模式之控制架構如下圖 3-13 所示。

首先透過感測器量測逆變器輸出端之三相電壓 V_{oa} 、 V_{ob} 、 V_{oc} 與三相電流 i_{oa} 、 i_{ob} 、 i_{oc} ，將量測到之三相資訊透過帕克轉換至同步旋轉座標軸上，而其實功 P 與虛功 Q 可以下式(3-19)、(3-20)表示：

$$P = \frac{3}{2}(v_d i_d + v_q i_q) \quad (3-19)$$

$$Q = \frac{3}{2}(v_q i_d - v_d i_q) \quad (3-20)$$

其中 v_d 和 v_q 分別為在 d 軸與 q 軸上之變流器輸出電壓， i_d 和 i_q 分別為在 d 軸與 q 軸上之變流器輸出電流。將計算出之變流器輸出功率與命令值 P^* 和 Q^* 做比較並經由 PI 控制器，搭配前述之雙二階廣義積分鎖相迴路(DSOGI-PLL)得到電壓估測相角 θ_e ，當鎖相完成時 v_d 等於零，此時變流器輸出實功 P 與虛功 Q 可分別透過 i_q 與 i_d 控制以完成功率調節之目的。

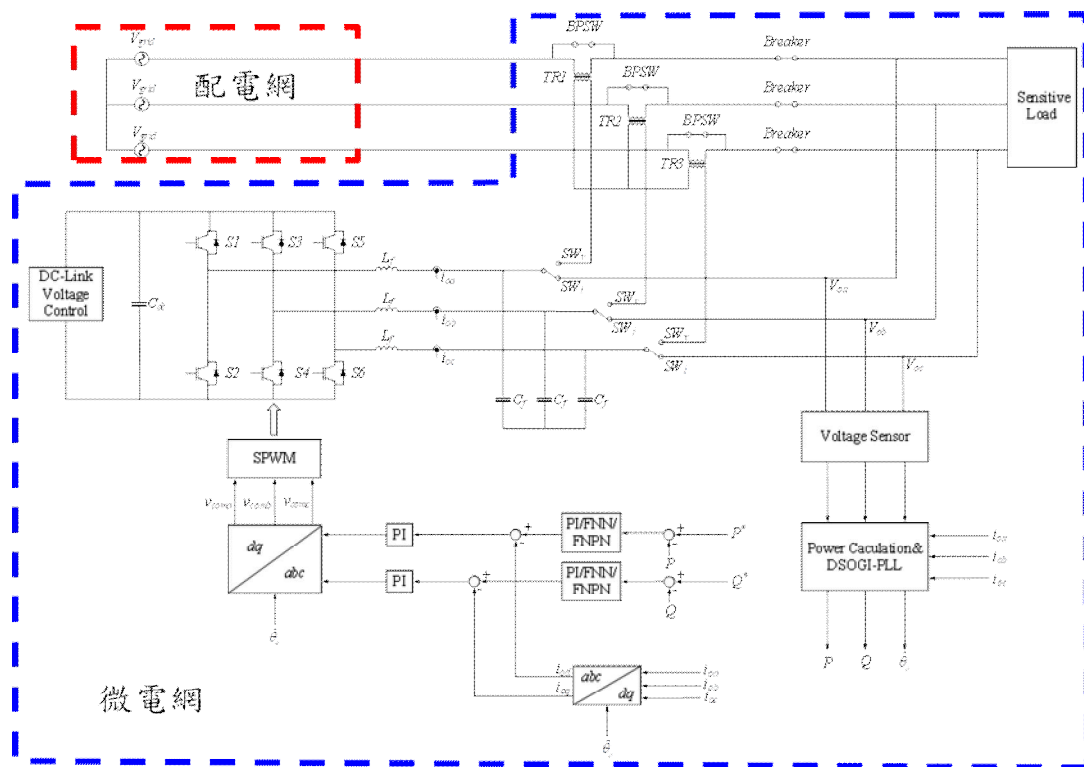


圖 3-13、功率調節模式控制圖

3. 電壓補償模式控制

當電源端電壓發生問題時，本文系統將工作在電壓補償模式，此時系統與輸配電線路以串聯形式連接，此模式針對電源端發生的電力品質事件進行電壓補償，改善電壓波形失真問題並降低負載端受電力事件之影響，此模式之控制架構如下圖 3-14 所示。

先透過電壓感測器得到電源端三相電壓 V_{sa} 、 V_{sb} 、 V_{sc} ，透過此資訊可得知電源端是否發生問題，並利用帕克轉換得到其在旋轉座標軸上之值 V_{sd} 與 V_{sq} ，將參考電壓值 V_{sd}^* 、 V_{sq}^* 與電源端電壓資訊 V_{sd} 與 V_{sq} 比較即可得到補償電壓命令 V_{Injd}^* 、 V_{Injq}^* 。最後將補償命令值與逆變器輸出之補償電壓資訊 V_{Injd} 、 V_{Injq} 做比較再經由智慧型控制器或 PI 控制器，搭配前述之雙二階廣義積分鎖相迴路(DSOGI-PLL)得到電源端估測之電壓相角 θ_e ，即可輸出開關控制訊號完成電壓補償之目的。

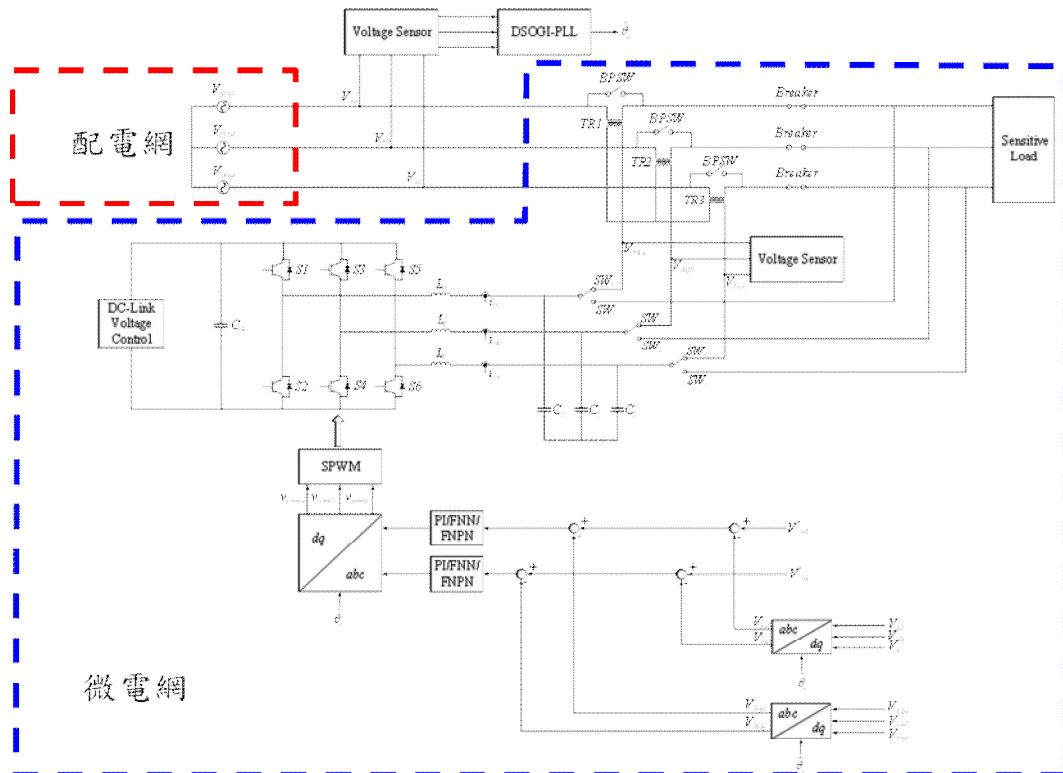


圖 3-14、電壓補償模式控制圖

4. 不斷電系統模式控制

當電源端電壓發生問題，且其電壓大小低於 0.1 pu 時即視為發生電力中斷事件，本文系統將工作於不斷電系統模式，此時系統與輸配電線路以並聯形式連接，此模式可於電源端電力中斷時提供負載所需之電壓大小、頻率與功率，並維持一定的時間直至電源端恢復電力供給，此模式之控制架構如下圖 3-15 所示。

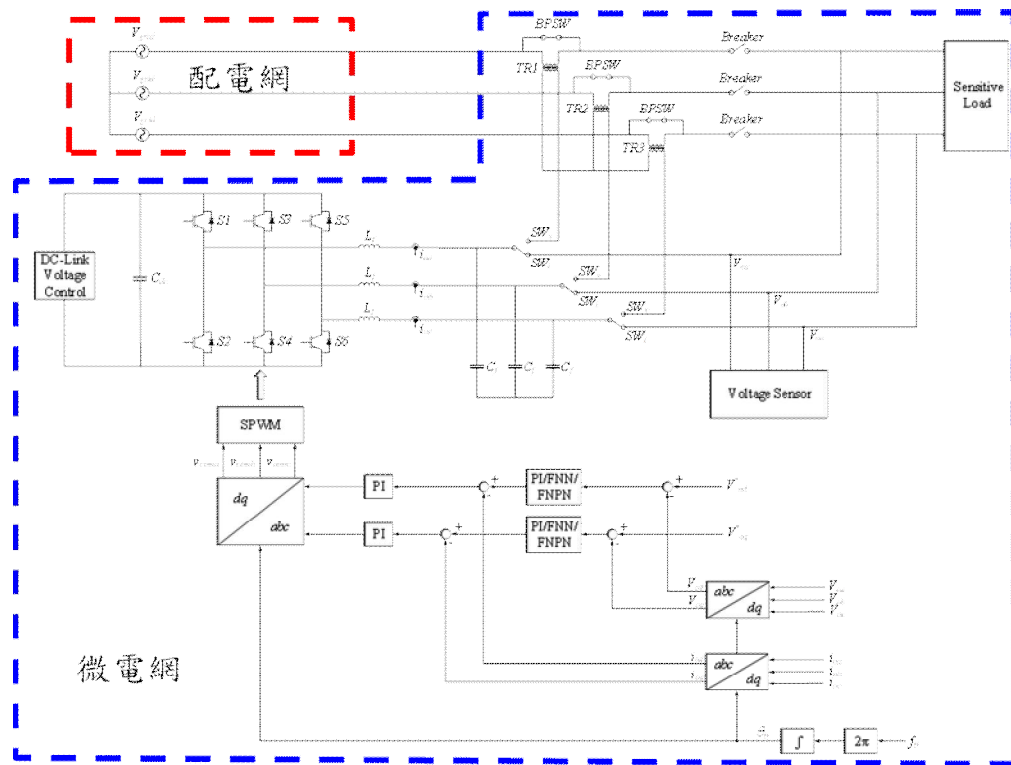


圖 3-15、不斷電系統模式控制圖

當偵測到電力中斷時，斷路器首先跳脫使負載脫離電源端，本文之系統透過電壓與電流感測器偵測逆變器輸出三相電壓 V_{oa} 、 V_{ob} 、 V_{oc} 與三相電流 i_{oa} 、 i_{ob} 、 i_{oc} ，透過帕克轉換將三相資訊轉換至同步旋轉座標軸，其中 v_{od} 和 v_{oq} 分別為在 d 軸與 q 軸上之變流器輸

出電壓， i_{od} 和 i_{oq} 分別為在 d 軸與 q 軸上之變流器輸出電流，與電壓命令值 v_{od}^* 、 v_{oq}^* 得到之誤差命令經 PI 控制器即可得到所需之三相電壓大小，搭配由基頻 f_0 得到之相角 θ_0 得到所需之電壓頻率與相位，最後輸出開關控制訊號至電壓源逆變器，即可輸出負載所需之三相電壓，達成暫時供電之目的。

5. 模式切換流程

本文所提出之系統可根據電源端供電狀態切換至適當的模式進行控制，其模式切換流程如圖 3-16 所示。首先，系統由電壓感測器偵測輸配電線路以檢測電源端是否出現電力事件，若電源端處於正常供電則系統工作於之功率調節模式，並檢測直流端儲能元件當前電量決定充放電，若檢測到電力事件出現，則首先判斷是否為電力中斷事件，若電源端依然維持供電則系統工作在電壓補償模式，若為電力中斷事件則系統啟動斷路器將負載切離電網並工作在不斷電系統模式。

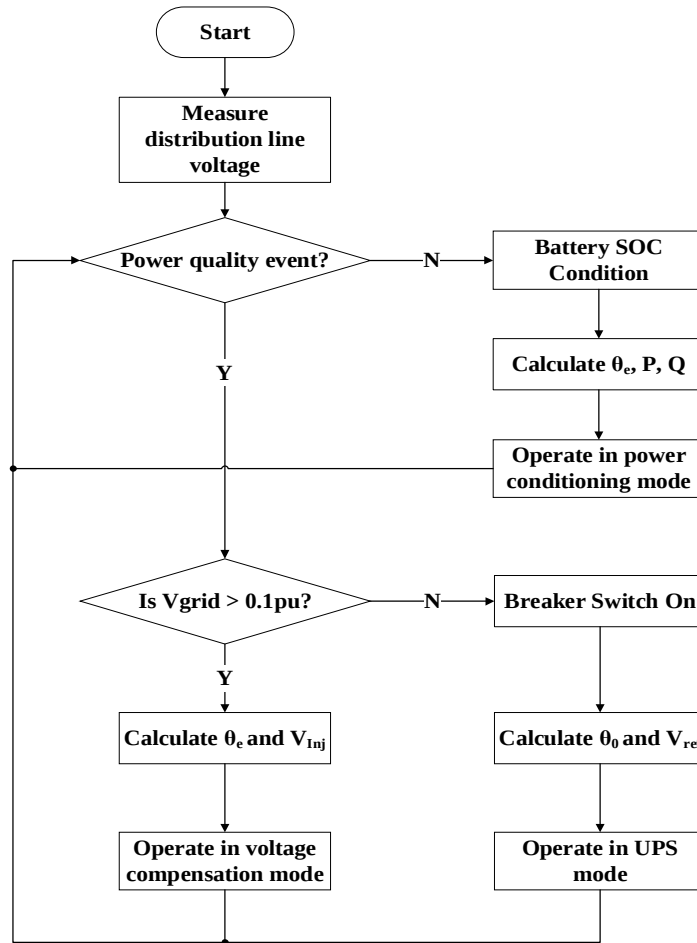


圖 3-16、本文漸進式調控模式切換流程圖

(七) 模糊派翠類神經網路

傳統 PI 控制器有著控制架構簡單，且參數設計較容易之優點，然而現實中大部分電力系統多為非線性且存在許多不確定性，此時因 PI 控制器的動態響應較差，容易造成系統控制上的不穩定。

本節將分別介紹模糊控制理論、派翠網路以及類神經學習法則，而結合上述三者之優點即為模糊派翠類神經網路，並透過監督式梯度陡降法之倒傳遞法(Back Propagation)訓練網路架構，以取代傳統 PI 控制器使系統在電壓補償上能獲得更良好的控制性能。

1. 模糊控制理論

模糊推論系統的基本控制方塊圖如下圖 3-17 所示，其主要由四個控制系統組合而成，分別為模糊化界面(Fuzzification)、模糊規則庫(Fuzzy Rule Base)、模糊推論工廠(Fuzzy Inference Engine)以及解模糊化界面(Defuzzification)[45]。

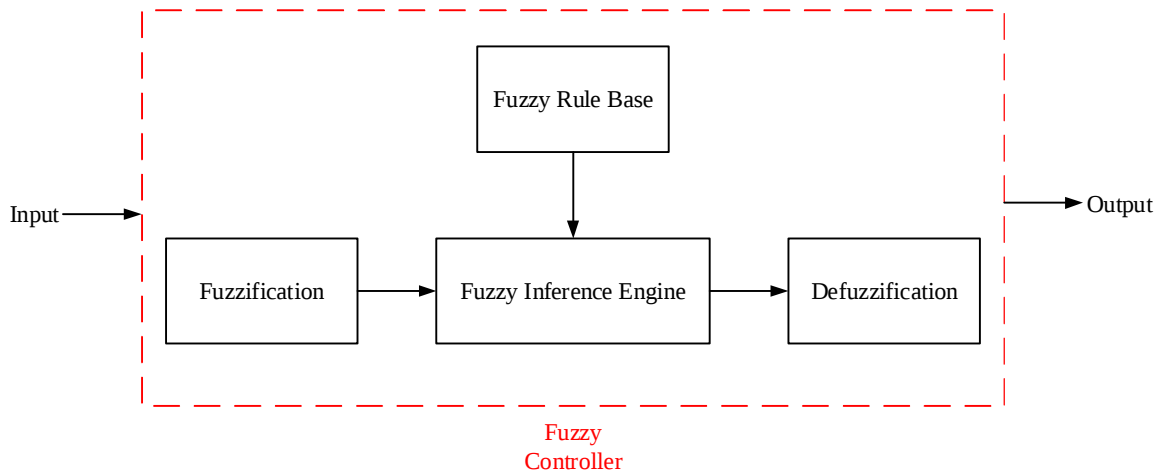


圖 3-17、模糊控制理論方塊圖

(1) 模糊化介面(Fuzzification)

一般在明確集合當中，判斷某一元素屬於或不屬於某一集合只有一個明確答案，我們可用一特性函數(Characteristic function)如下式(3-21)表示，其中 A 為一明確集合， x 為任一元素而其隸屬度非 1 即 0，以此描述該元素屬於或不屬於明確集合 A 。

$$\Phi_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases} \quad (3-21)$$

換句話說， x 屬於或不屬於集合 A 可以很明確的以輸出 1 與 0 來表

示，沒有模糊地帶。但是在現實當中，我們對於事物的表示方式通常不會只有是與否兩種答案，而是具有模糊性。考慮一新的集合 F 其特性函數 $\mu_F(x)$ 的值介於 0 與 1 之間，如下式(3-22)所示：

$$\begin{aligned}\mu_F(x_1) &= 0.7 \\ \mu_F(x_2) &= 0.2\end{aligned}\tag{3-22}$$

可以明顯的看出 $\mu_F(x_1) > \mu_F(x_2)$ ，也就表示元素屬於集合 F 有輕重大小之分，此時稱 F 為模糊集合(Fuzzy set)而特性函數 $\mu_F(x)$ 則稱為歸屬函數(Membership function)。

(2) 模糊規則庫(Fuzzy Rule Base)

模糊規則庫主要由資料庫(Data Base)以及規則庫(Rule Base)所組成，其中資料庫的功能為儲存模糊邏輯中的重要資料，包括輸入、輸出資料變數、模糊集合所使用的歸屬函數及其歸屬度等，而規則庫則是模糊邏輯推論中的核心，主要利用專家知識 IF-THEN 形式的模糊推理句所組成的一系列規則，再將其整理為可供查詢之規則表(Rule Table)。最常見的模糊規則為語意式模糊規則(Linguistic Fuzzy Rule)，其形式如式(3-23)所示：

$$R^l : \text{if } x_1 \text{ is } A_1^l \text{ and...and } x_n \text{ is } A_n^l, \text{ then } y \text{ is } B^l \tag{3-23}$$

其中 $A_i^l (i=1, 2, \dots, n)$ 與 B^l 可稱為模糊規則之前命題與後命題，為語句變數(Linguistic Variable)之模糊集合。

在模糊規則庫中有三個重要性質需特別注意，分別敘述如下：

- A. 完全性(Complete)：每個輸入 x 一定要觸發到一條規則，否則該輸入會無法處理。
- B. 一致性(Consistent)：沒有任兩個模糊規則具有相同的前命題，卻有不同的後命題，否則系統會出現矛盾現象。
- C. 連續性(Continuous)：連續型模糊集合每兩條相鄰的模糊規則之後命題必定有重疊區域，否則將影響其控制效果。

(3) 模糊推論工廠(Fuzzy Inference Engine)

當模糊規則庫建立後，依據每條模糊規則間的關係可將其視為一個模糊推論工廠，其又分為乘積推論工廠(Product inference engine)、最小推論工廠(Minimum inference engine)、札德推論工廠(Zadeh inference engine)等不同類型，主要功能為根據所使用的模糊推論工廠處理被觸發的模糊規則之關係運算，以得到輸出模糊集合。

(4) 解模糊化介面(Defuzzification)

一般控制系統中往往需要的是一個明確值，因此如何連結模糊系統與實際需求的明確量即是解模糊化的目的。解模糊化的過程與模糊化相反，是將一模糊集合 $B(y)$ 轉換至一個明確值 y^* 的動作，其大致依靠以下三個準則來決定：

- A. 合理性：至少在人的直覺上， y^* 代表 $B(y)$ 是合理且可被接受的。
- B. 計算簡單：為了在模糊推論工廠的運算上較為方便。
- C. 連續性： $B(y)$ 之形狀有稍許的變化， y^* 之位置也是稍許變化。

只要符合上面準則而定義的解模糊化法均可被接受，現有許多文獻提到諸多解模糊化法，以下列出幾種較常使用的方法：

(1) 重心解模糊化法(Center of gravity defuzzification, COG)

$$y^* = \frac{\int_Y yB'(y)dy}{\int_Y B'(y)dy} \quad (3-24)$$

式(3-24)的分母即為 $B(y)$ 之面積，由分式計算出來之值即是該面積之重心在 Y 軸上的投影位置，為最合理的方法，但計算上較為複雜。

(2) 中心平均值解模糊化法(Center average defuzzification, CAD)

$$y^* = \frac{\sum_{l=1}^m p_l h(B'_l)}{\sum_{l=1}^m h(B'_l)} \quad (3-25)$$

此法也被稱為高度解模糊化法(height defuzzification, HD)，其中 $h(B'_l)$ 表示每個輸入觸發之高度， p_l 表示 B'_l 之中心點，是常用的解模糊法之一。

(3) 最大值之平均值解模糊化法(Middle of maxima defuzzification, MOM)

$$y^* = \frac{y_F^* + y_L^*}{2} \quad (3-26)$$

式(3-26)中之 y_F^* 為模糊集合 $B'(y)$ 的第一個最高點 $h(B'_l)$ 在 Y 軸上之投影位置， y_L^* 為模糊集合 $B'(y)$ 的最後一個最高點 $h(B'_l)$ 在 Y 軸上之投影位置，其平均值則為式(3-26)，此法計算簡單但較不準確。

2. 派翠網路

派翠網路是由德國數學家卡爾·亞當·派翠(Carl Adam Petri)於西元 1962 年所提出，為一種模型化系統分析與發展的工具，以一些簡單的圖形符號去描述系統中之程序與邏輯，可用於分析動態系統的特性。基本的派翠網路結構如圖 3-18 所示，其主要由四個元素所組成，分別敘述如下：

- (1) 位置節點(places)：通常以圓圈表示，節點內可含有或不含有標記點，每個位置節點內至多只有一個標記點。
- (2) 轉移節點(transitions)：通常以粗線或是矩形表示，當位置節點內之標記滿足條件時，轉移節點被活化使標記點向前傳遞。
- (3) 有向性線段(arc)：通常以單方向之箭頭表示，為位置節點與轉移節點的流向連接。
- (4) 標記點(token)：通常以點狀表示，表示關於系統的程序或資源。

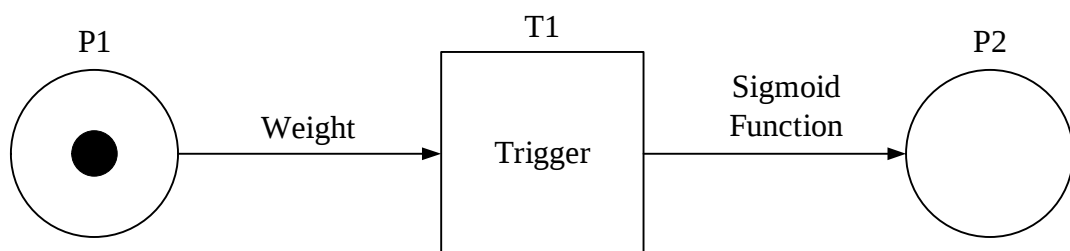


圖 3-18、基本派翠網路架構圖

現如今有許多文獻運用派翠網路做模型分類與系統辨識之用途 [46]，電力系統中可利用感測器偵測故障發生，並使用模糊推論得

到系統正常運作與故障之模糊關係，以此建立派翠網路之結構，通過適當的轉移節點函數(T1)決定位置節點(P1)內標記點的轉換過程，若滿足條件則標記點由輸入(P1)轉移至輸出位置(P2)，反之不進行轉移，以此減少不必要之訊息資源，進而加快系統的運算與響應速度。

3. 模糊派翠類神經網路架構

模糊邏輯(Fuzzy Logic)可藉由模糊資訊以降低控制設計的複雜度，但其本身並沒有學習機制。而類神經網路(Neural Network, NN)為模擬人類神經元訊號的傳遞，藉由自主學習改變連接權重(Weight)使誤差逐漸縮小，結合以上兩者即為模糊類神經網路。

本文應用派翠網路搭配傳統模糊類神經網路，即模糊派翠類神經網路(Fuzzy Neural Petri Net, FNPN)，運用模糊推論系統的推理能力有效處理電力系統中之非線性與不確定之資訊，而派翠網路透過適當的轉移函數設計，可幫助系統辨識電力事件，減少不必要之神經元以加快網路運算速度，最後結合類神經網路之線上學習能力即時調整網路參數與連接權重值。

模糊派翠類神經網路架構如圖 3-19 所示，為一分為五層的神經網路架構，由輸入層、歸屬函數層、規則層、派翠層以及輸出層所組成，其中 x_1 通常為誤差， x_2 通常為誤差之變化量，有關模糊派翠類神經網路其輸入訊號在每一層之傳遞情形如下所述：

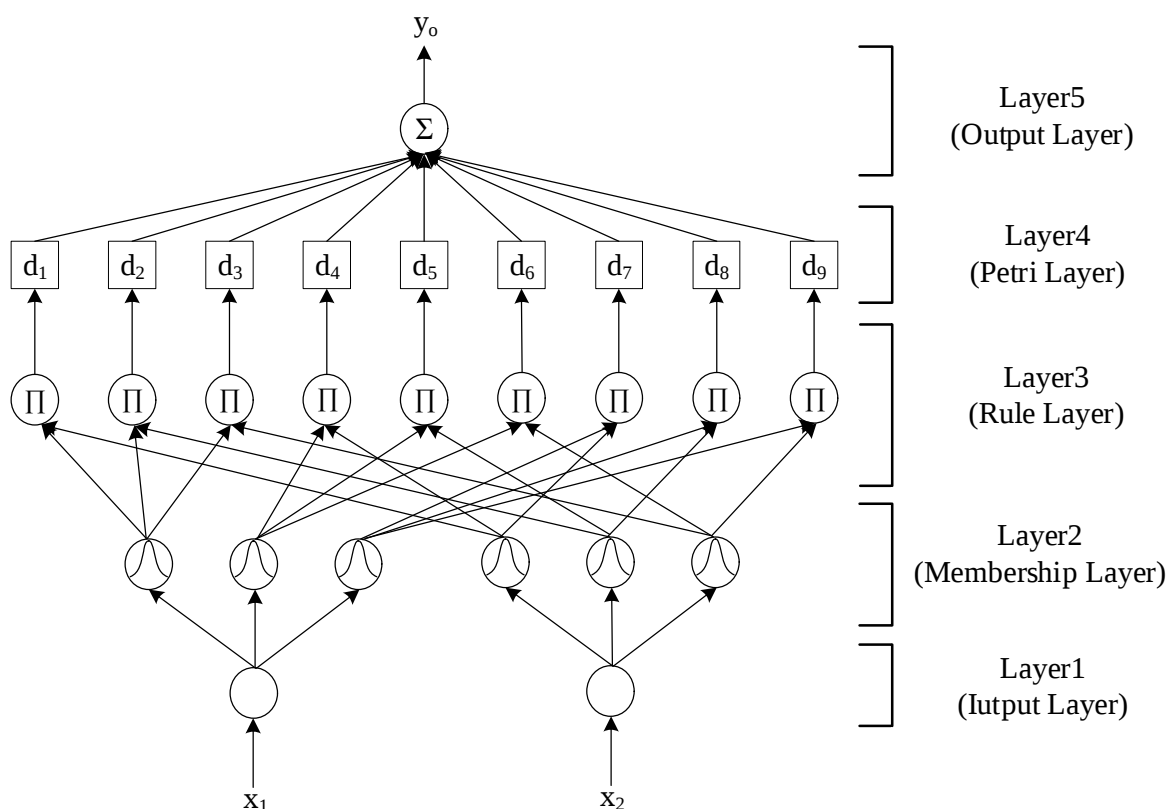


圖 3-19、模糊派翠類神經網路架構圖

第一層：輸入層(Input Layer)

輸入層有兩個神經元，各代表一個輸入變數，此層不做運算，

第 i 個神經元之淨輸入與淨輸出定義如下式(3-27)、(3-28)：

$$net_i^1 = x_i^1 \quad (3-27)$$

$$y_i^1 = f_i^1(net_i^1) = net_i^1 \quad (3-28)$$

其中 x_i^1 和 y_i^1 表示第 i 個神經元的輸入及輸出訊號，本文之 x_1^1 為電壓補償命令與輸出補償命令之誤差， x_2^1 為誤差的變化量。

第二層：歸屬函數層(Membership Layer)

歸屬函數層由輸入層之兩個神經元個別分出三個歸屬函數，此

層每一個輸入訊號對應一個歸屬函數，以實現神經元的模糊化，本文使用高斯函數作為歸屬函數，歸屬函數層的輸入及輸出式定義如下(3-29)、(3-30)：

$$net_j^2 = -\frac{(x_i^2 - m_{ij})^2}{(\sigma_j^2)^2} \quad (3-29)$$

$$y_j^2 = f_j^2(net_j^2) = \exp(net_j^2) \quad (3-30)$$

其中 m_{ij} 與 σ_{ij} 分別代表表示第 i 個輸入變數 x_i^2 對應之第 j 個神經元內所屬的高絲函數中心值(Mean)與標準差(Standard Deviation)。

第三層：規則層(Rule Layer)

規則層將模糊化之輸入經由模糊推論工廠做運算，此處採用乘積推論工廠形式，將第二層的輸出兩兩相乘，規則層的輸入及輸出式定義如下(3-31)、(3-32)：

$$net_k^3 = \prod_j w_{jk}^3 x_j^3 \quad (3-31)$$

$$y_k^3 = f_k^3(net_k^3) = net_k^3 \quad (3-32)$$

其中 x_j^3 代表輸入至第三層的第 j 個輸入值， w_{jk}^3 代表歸屬函數層與規則層之鏈接權重值，符號 $\prod_j$ 表示第 j 個輸入訊號做模糊運算。

第四層：派翠層(Petri Layer)

派翠層將輸入訊號經由派翠網路做分析，當規則層輸出(標記點)傳遞至派翠層輸入位置，透過轉換函數開始節點轉換，由等式

(3-33)、(3-34)觸發或解除轉換：

$$t_p^4(x) = \begin{cases} 1, y_k^3 \geq d_{th} \\ 0, y_k^3 < d_{th} \end{cases} \quad (3-33)$$

$$d_{th} = \begin{cases} \frac{\alpha \exp(-\beta V)}{1 + \exp(-\beta V)}, \text{reference command} \geq 0 \\ 1 - \frac{\alpha \exp(-\beta V)}{1 + \exp(-\beta V)}, \text{reference command} < 0 \end{cases} \quad (3-34)$$

其中 $t_p^4(x)$ 為轉換狀態， d_{th} 為經由函數 $V = \frac{e + \dot{e}}{2}$ 改變的閾值，其中 α 和 β 皆為正常數。若誤差 e 與誤差微分 $\dot{e}$ 有增加的趨勢，即表示系統正常命令間之誤差越大，則閾值會越低轉換越容易觸發，反之閾值越高以阻止轉換發生，以此可快速減少不必要之訊息，加快控制器運算速度。

而當轉換觸發，標祭點由派翠層之輸入位置移置輸出，此時派翠層之輸入與輸出關係式如下式(3-35)、(3-36)：

$$net_p^4 \begin{cases} y_k^3, t_p^4(x) = 1 \\ 0, t_p^4(x) = 0 \end{cases} \quad (3-35)$$

$$y_p^4 = f_p^4(net_p^4) = net_p^4 \quad (3-36)$$

其中 y_p^4 為派翠層第 p 個神經元之輸出。

第五層：輸出層(Output Layer)

第五層之神經元標示 Σ 表示將所有輸入此神經元之訊號做加總

運算，並在此層執行解模糊運算，輸出層之輸入與輸出以下式(3-37)、(3-38)表示：

$$net_o^5 = \sum_p w_{po}^5 y_p^4 \quad (3-37)$$

$$y_o^5 = f_o^5(net_o^5) = net_o^5 \quad (3-38)$$

其中 w_{po}^5 為連接派翠層與輸出層之連接權重， y_o^5 為模糊派翠類神經網路的輸出值。

4. 模糊派翠類神經網路之線上學習法則

本文使用之模糊派翠類神經網路利用倒傳遞演算法(BP)自適應地更新網路架構參數與連結權重，使控制器在受到干擾的情況下依然保持穩定的控制效能。首先定義一誤差能量函數 E 如下式(3-39)：

$$E = \frac{1}{2} (y_o^* - y_o)^2 = \frac{1}{2} e^2 \quad (3-39)$$

其中 y_o^* 為希望得到之輸出值， y_o 為實際輸出值，有了誤差能量函數 E 即可利用倒傳遞演算法推導網路加權值的更新公式，其過程如下：

第五層：輸出層(Output Layer)

輸出層之誤差項經由倒傳遞計算如下：

$$\delta_o^5 = -\frac{\partial E}{\partial y_o^5(N)} = -\frac{\partial E}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial y_o^5(N)} \quad (3-40)$$

派翠層與輸出層之連接權重 $w_{po}^5(N)$ 更新疊代如下：

$$\Delta w_{po}^5 = -\eta_{po} \frac{\partial E}{\partial w_{po}^5(N)} = -\eta_{po} \frac{\partial E}{\partial y_o^5(N)} \frac{\partial y_o^5(N)}{\partial w_{po}^5(N)} = \eta_{po} \delta_o^5 y_p^4 \quad (3-41)$$

$$w_{po}^5(N+1) = w_{po}^5(N) + \Delta w_{po}^5 \quad (3-42)$$

其中 η_{po} 為 $w_{po}^5(N)$ 的學習率。

第四層：派翠層(Petri Layer)

由於規則層至派翠層只做派翠網路之轉移函數運算，其誤差項如下所示：

$$\delta_p^4 = -\frac{\partial E}{\partial y_p^4(N)} = -\frac{\partial E}{\partial y_o^5(N)} \frac{\partial y_o^5(N)}{\partial y_p^4(N)} = \delta_o^5 w_{po}^5 \quad (3-43)$$

第三層：規則層(Rule Layer)

歸屬函數層至規則層只做模糊乘積運算，其連接權重值為 1，因此只計算到傳遞之誤差項如下：

$$\delta_k^3 = -\frac{\partial E}{\partial y_k^3(N)} = -\frac{\partial E}{\partial y_o^5(N)} \frac{\partial y_o^5(N)}{\partial y_p^4(N)} \frac{\partial y_p^4(N)}{\partial y_k^3(N)} = \delta_p^4 t_p^4 \quad (3-44)$$

第二層：歸屬函數層(Membership Layer)

歸屬函數層之誤差項計算如下：

$$\begin{aligned} \delta_j^2 &= -\frac{\partial E}{\partial net_j^2} \\ &= -\left[\frac{\partial E}{\partial y_o^5(N)} \frac{\partial y_o^5(N)}{\partial y_p^4(N)} \frac{\partial y_p^4(N)}{\partial y_k^3(N)} \right] \frac{\partial y_k^3(N)}{\partial y_j^2(N)} \frac{\partial y_j^2(N)}{\partial net_j^2(N)} \\ &= \sum_k \delta_k^3 y_k^3 \end{aligned} \quad (3-45)$$

高斯函數之中心值 m_j^2 和標準差 σ_j^2 之調整公式如下：

$$\begin{aligned}
\Delta m_j^2 &= -\eta_m \frac{\partial E}{\partial m_j^2} \\
&= -\eta_m \frac{\partial E}{\partial y_o^5(N)} \frac{\partial y_o^5(N)}{\partial y_p^4(N)} \frac{\partial y_p^4(N)}{\partial y_k^3(N)} \frac{\partial y_k^3(N)}{\partial y_j^2(N)} \frac{\partial y_j^2(N)}{\partial net_j^2(N)} \frac{\partial net_j^2(N)}{\partial m_j^2} \quad (3-46) \\
&= \eta_m \delta_j^2 \frac{2(x_i^2 - m_j^2)}{(\sigma_j^2)^2}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Delta \sigma_j^2 &= -\eta_\sigma \frac{\partial E}{\partial \sigma_j^2} \\
&= -\eta_\sigma \frac{\partial E}{\partial y_o^5(N)} \frac{\partial y_o^5(N)}{\partial y_p^4(N)} \frac{\partial y_p^4(N)}{\partial y_k^3(N)} \frac{\partial y_k^3(N)}{\partial y_j^2(N)} \frac{\partial y_j^2(N)}{\partial net_j^2(N)} \frac{\partial net_j^2(N)}{\partial \sigma_j^2} \quad (3-47) \\
&= \eta_\sigma \delta_j^2 \frac{2(x_i^2 - m_j^2)^2}{(\sigma_j^2)^3}
\end{aligned}$$

其中 η_m 和 η_σ 分別為高斯函數中心值與標準差之學習率。而高斯函數之中心值與標準差更新公式如(3-48)、(3-49)所示：

$$m_j^2(N+1) = m_j^2(N) + \Delta m_j^2 \quad (3-48)$$

$$\sigma_j^2(N+1) = \sigma_j^2(N) + \Delta \sigma_j^2 \quad (3-49)$$

上述公式之 N 均表示其疊代次數。

另外，由於系統存在不確定性，因此輸出層之誤差項 δ_o^5 難以精確求得，為了解決這個問題並加快網路參數與權重之線上學習速率，利用誤差適應法將式(3-40)替換如下：

$$\delta_o^5 = e + \dot{e} \quad (3-50)$$

正常情況下之電壓補償控制可將式(3-50)改下如下：

$$\delta_o^5 \cong (V_{Inj}^* - V_{Inj}) + (\dot{V}_{Inj}^* - \dot{V}_{Inj}) = e + \dot{e} \quad (3-51)$$

利用以上公式可即時調整網路參數與連接權重值，使本文所提之模糊派翠類神經網路達成線上學習之目標。

四、建構微電網模型，並以即時模擬驗證所提之漸進式輔助調控策略邏輯

根據本研究所提出之多模式漸進式輔助電力調節系統，本文使用 MATLAB/Simulink 軟體建置電力系統模擬環境，電源端可依照要求產生各種所需之情境，以驗證本文提出之系統架構與控制法的可行性，同時也能比較分析本文提出之模糊派翠類神經網路與其他控制器在不同控制法下的響應結果。

(一) 本文系統模擬環境建置

本文建置之電力系統模擬環境相關參數如下表 4-1，建置之模擬環境示意如圖 4-1 所示，其中包括可調變之三相電壓源、三相負載以及本文之系統架構，透過設定三相電源的參數產生不同的電力事件，以此測試本文提出之系統在各模式下之響應結果，並由三相電壓、電流感測器量測數值，計算不同電力事件下之相關規範指標值，以比較不同控制器在負載補償上的結果。

表 4-1、電力系統模擬相關參數

系統參數	數值
Power GUI Sampling Time	5 us
Grid Voltage(RMS)	220 V
DC-Link Voltage	800 V

LC Filter	L:3 mH, C:100 uF
Load	10 kW
Switching Frequency	10 kHz

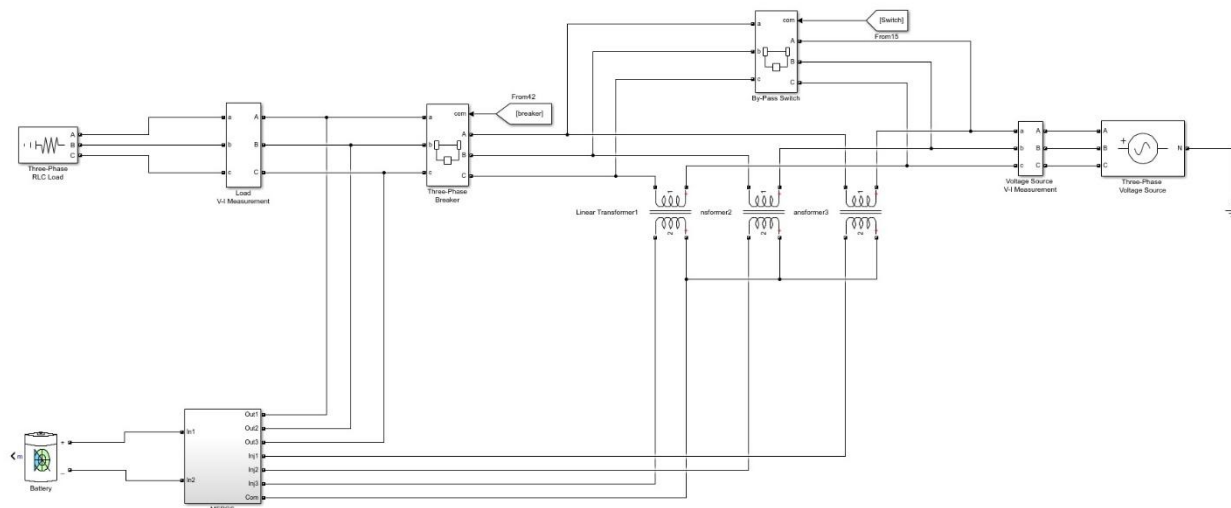


圖 4-1、本文建置之電力系統模擬環境

(二) 系統直流鏈電壓控制分析

多功能功率調節系統之直流鏈電壓不論工作在何種模式下皆須維持穩定，系統才能輸出所需之功率與電壓。本文建置之電力系統模擬環境使用的三相電壓源為 MATLAB /Simulink 中的可程式化電源模塊，藉由設定電力事件發生之起始時間、結束時間與變化程度，設計不同的情境如表 4-2，測試本文系統向輸配電線路輸出或吸收功率時，直流鏈電壓是否皆能維持在所需之直流值，同時驗證直流鏈電壓之架構設計與控制法的可行性。

表 4-2、電壓源參數設計

電力事件設計	狀況描述	事件發生時間(秒)
三相電壓驟降	0.6 pu	0.2
三相電壓驟升	1.2 pu	0.2

如下圖 4-2 所示，三相電壓驟降事件發生時間點為 0.2 秒，此時系統將轉為電壓補償模式向輸配電線路注入實功率以維持負載電壓波形，而系統直流鏈電壓波形變化如圖 4-3 所示，可看出驟降事件發生瞬間直流電壓有些微之驟降情形，並於 0.22 秒時回復至所需之直流電壓值，使系統能穩定輸出補償電壓。

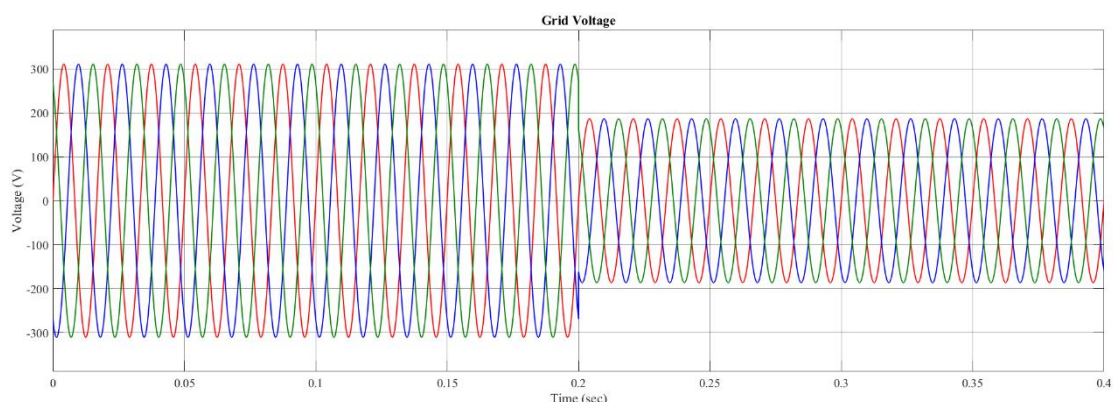


圖 4-2、三相電壓驟降電源端電壓波形圖

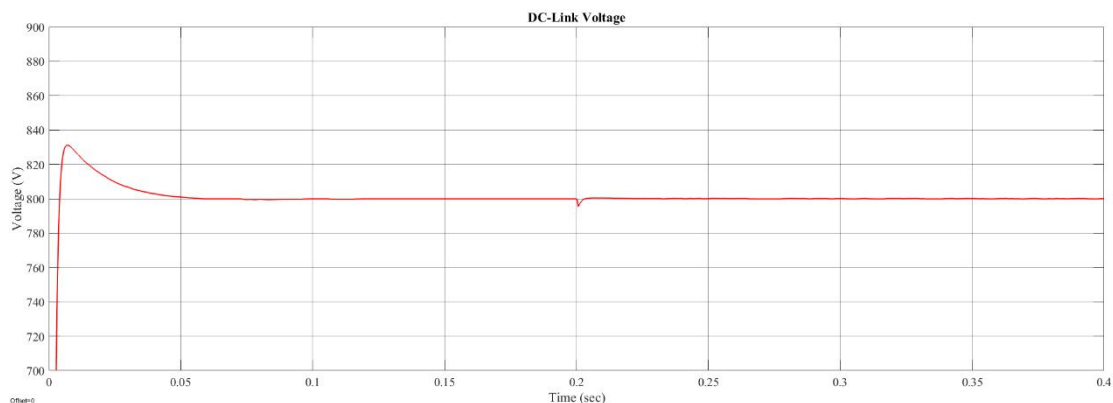


圖 4-3、電壓驟降直流鏈電壓波形放大圖

如下圖 4-4 所示，三相電壓驟升事件發生時間點為 0.2 秒，此時系統將從輸配電線路吸收功率以維持負載電壓波形，而系統直流鏈電壓波形變化如圖 4-5 所示，可看出驟升事件發生時直流鏈電壓具有短暫之驟升現象，並於 0.25 秒時回復至穩態。從以上兩個情境可

看出本文設計之直流鏈電壓架構與控制法，可有效穩定系統維持在所設計之直流電壓值。

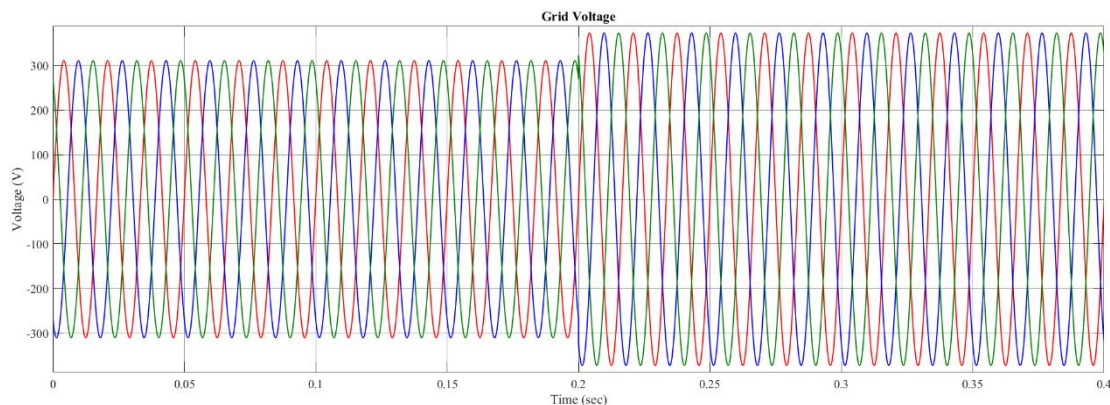


圖 4-4、三相電壓驟升電源端電壓波形圖

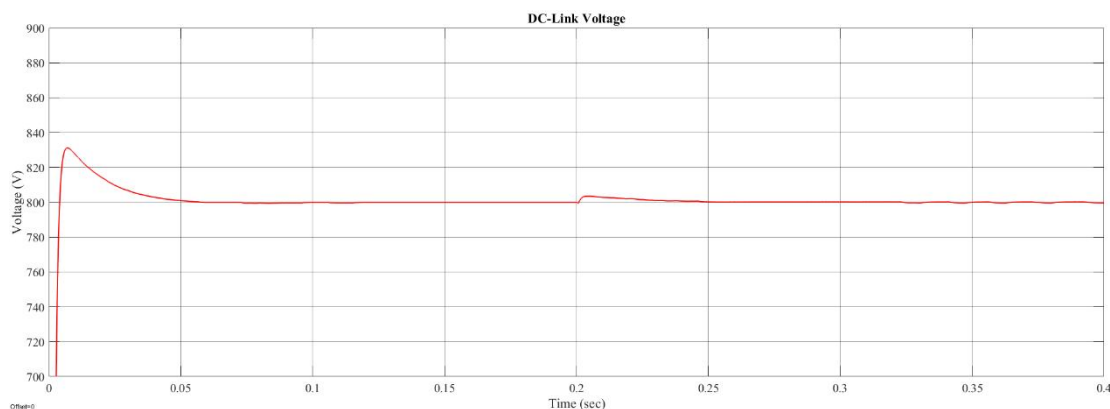


圖 4-5、電壓驟升直流鏈電壓波形放大圖

(三) 本文系統模式控制響應分析與比較

當電源端發生電力事件時，本文之系統將操作在電壓補償模式，此時系統透過控制輸出補償電壓至輸配電線路，以降低負載受電力事件之影響，並維持其電壓波形與所需功率。有關電力品質事件之模擬情境設計如下表 4-3 所示，根據不同的電力品質事件與其對應的規範指標，以方便分析本文提出之系統在電壓補償模式下的響應結果，並比較本文提出之模糊派翠類神經網路與傳統 PI 控制器

的控制效能。

表 4-3、電源端電力品質事件設計

電力品質事件	狀況描述	發生時間(sec)
三相電壓驟降	0.6 pu	0.1~0.3
三相電壓驟升	1.2 pu	0.1~0.3
三相電壓不平衡	A 相：0.6 pu	0.1~0.3
電壓閃爍	10 Hz, 0.1 pu	0.1~0.3
電壓諧波汙染	5 次：0.2 pu	0.1~0.3
	7 次：0.1 pu	
電力中斷	0.0 pu	0.2

1. 功率調節模式控制

當電源端處於正常供電時，本文之系統操作在功率調節模式，此時根據命令值(5 kW)向微電網提供額定實功率，且在不同情境下可對鋰電池進行充電，有關功率調節模式控制與鋰電池充放電狀態(SOC)之模擬示意圖如圖 4-6 所示，而模糊派翠類神經網路與其他控制器應用於功率調節模式控制之響應比較圖如圖 4-7，詳細比較則如表 4-4，可看出本文提出之模糊派翠類神經網路其暫態響應結果較佳。

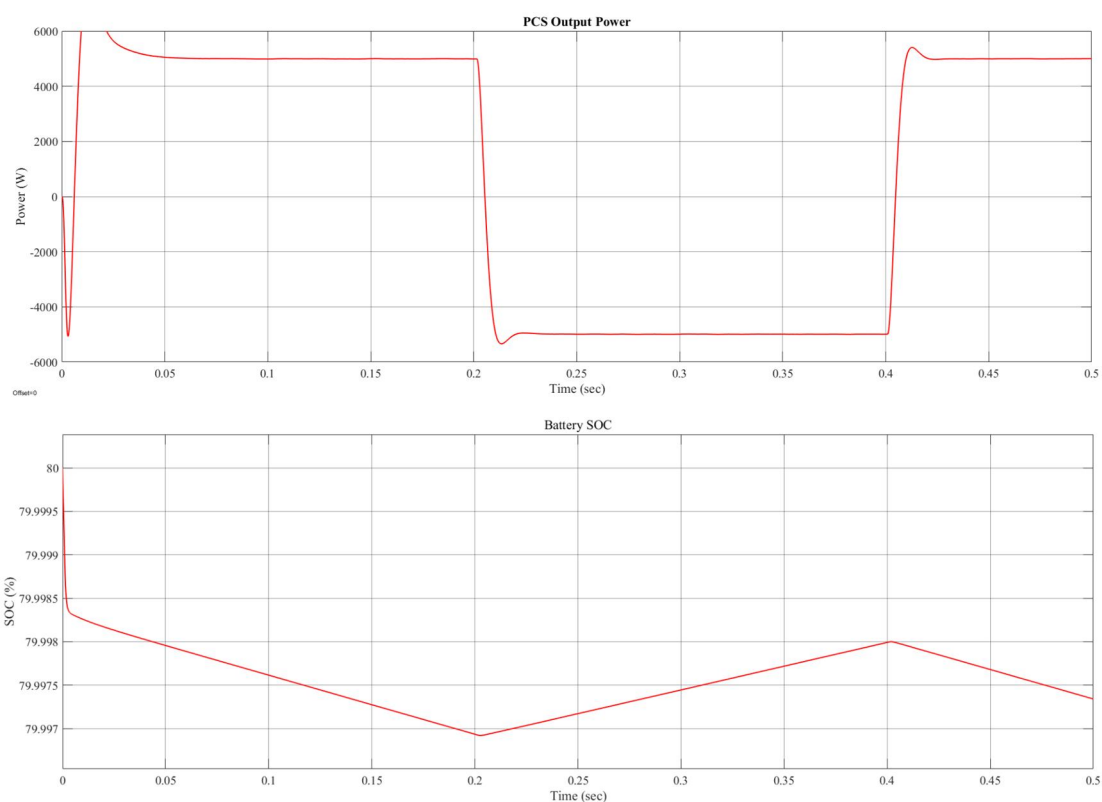


圖 4-6、功率調節控制與鋰充放電狀態示意圖

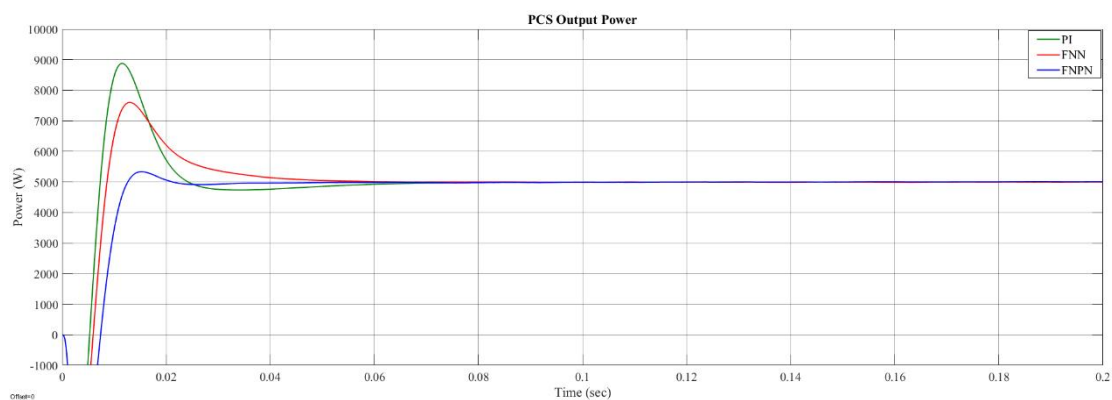


圖 4-7、功率調節模式控制器響應比較圖

表 4-4、功率調節模式控制器響應結果比較

控制方法	響應時間
PI	0.085(sec)
FNN	0.065(sec)
FNPN	0.04(sec)

2. Case1 三相電壓驟降

Case1 之模擬情境為三相電壓驟降，如圖 4-8 所示電源端電壓於 0.1~0.3 秒時發生電壓驟降事件，此時系統輸出補償電壓至輸配電線路如圖 4-9，而補償後之負載端電壓波形則如圖 4-10。

由圖 4-11 則可以看出本文之系統能有效執行模式切換，當電源端正常供電時，系統處於功率調節模式並根據命令值輸出 5 kW 實功率至負載，而當電壓驟降事件發生期間，系統轉為電壓補償模式向輸配電線路注入補償功率以改善負載端受事件的影響，最後，系統於驟降事件結束後則又轉為功率調節模式持續根據命令值提供功率。

圖 4-12 為本文系統於電壓驟降事件透過負載端功率變化進行效能比較，可看出本文系統於電壓驟降期間能持續維持負載端功率，而本文提出之模糊派翠類神經網路(FNPN)與其他控制器於補償上的響應結果詳細性能比較則如表 4-5，可看出 FNPN 之響應結果較佳。

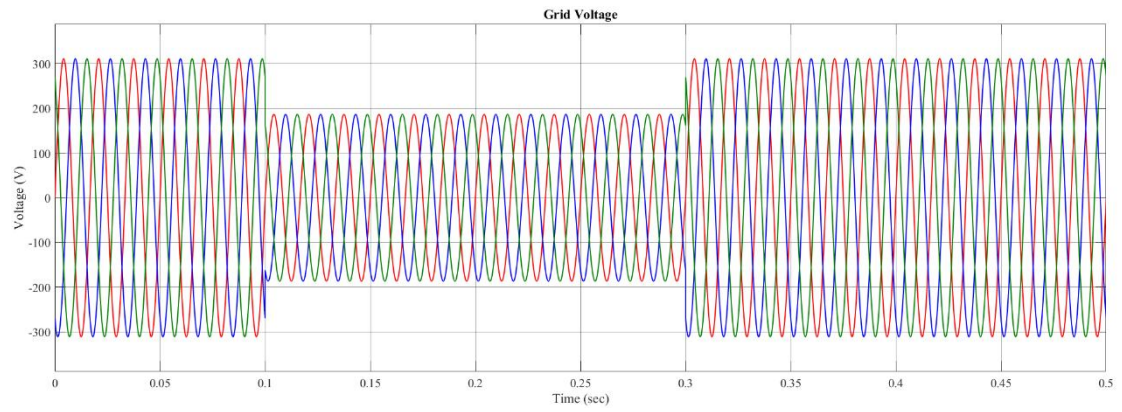


圖 4-8、三相電壓驟降電源端電壓波形

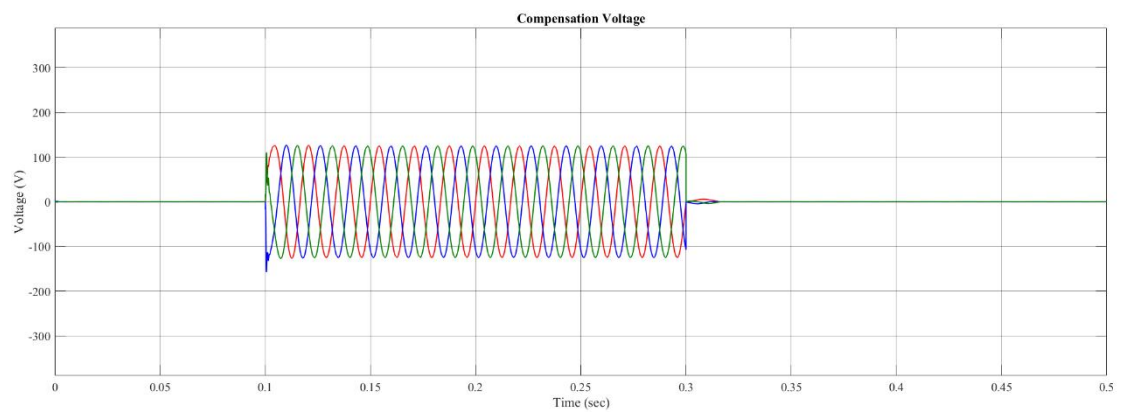


圖 4-9、三相電壓驟降系統注入補償電壓波形

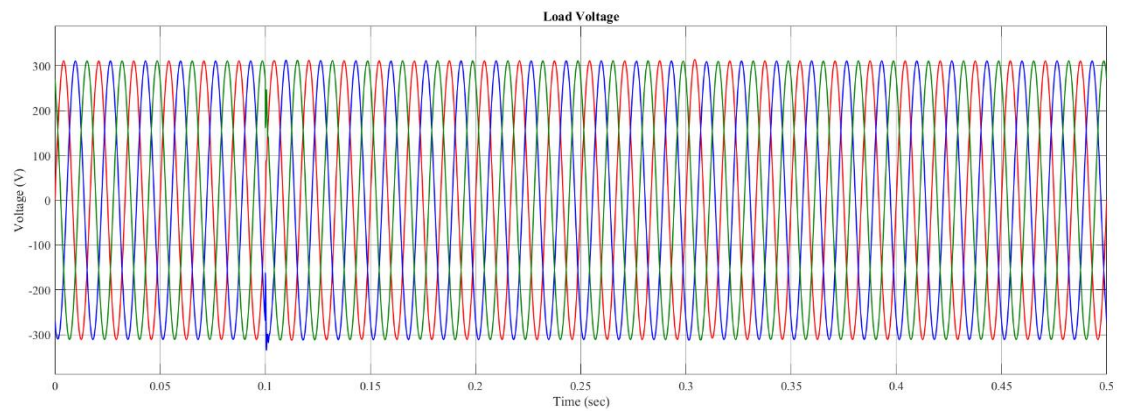


圖 4-10、三相電壓驟降負載端電壓波形

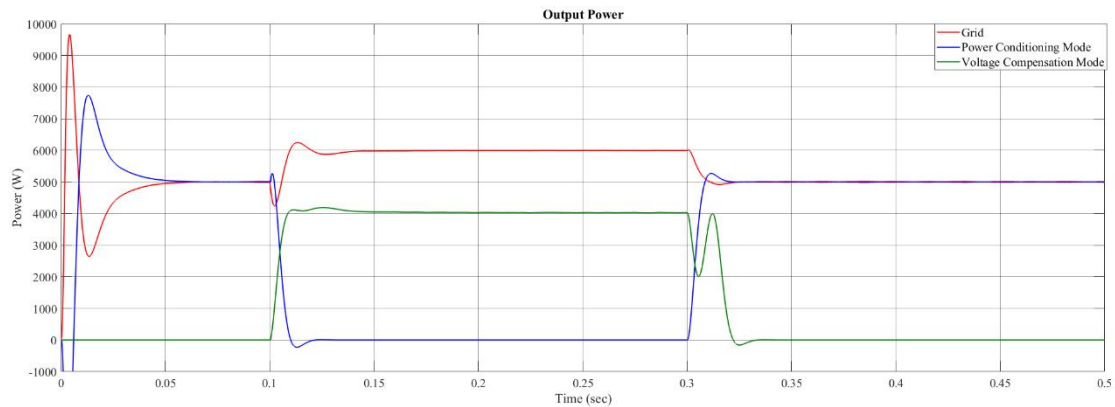


圖 4-11、三相電壓驟降電源端與系統模式切換輸出功率波型圖

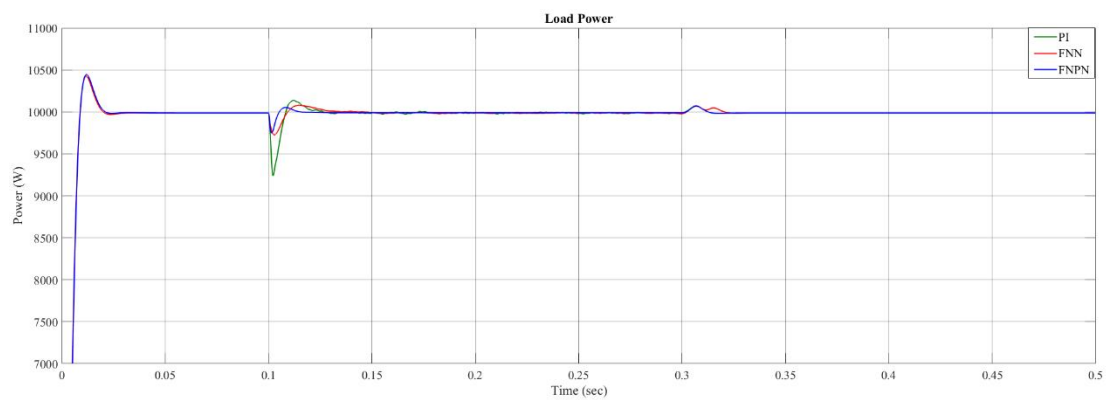


圖 4-12、三相電壓驟降控制器響應比較圖

表 4-5、三相電壓驟降控制器響應結果比較

控制方法	響應時間	最大超越量
PI	0.082(sec)	1.38(%)
FNN	0.050(sec)	0.79(%)
FNPN	0.015(sec)	0.53(%)

3. Case2 三相電壓驟升

Case2 之模擬情境為三相電壓驟升，如圖 4-13 所示電源端電壓於 0.1~0.3 秒時發生電壓驟升事件，此時系統輸出之補償電壓則如圖 4-14，而補償後之負載端電壓波形則如圖 4-15。

圖 4-16 則可以看出本文之系統在電壓驟升事件也能有效執行模式切換，當電源端正常供電時，系統處於功率調節模式並根據命令值輸出 5 kW 實功率至負載，而當電壓驟升事件發生，系統轉為電壓補償模式由輸配電線路吸收功率以避免負載持續承受過大的電壓導致可能損壞的情形，系統於驟升事件結束後則又轉為功率調節模式根據命令值提供功率。

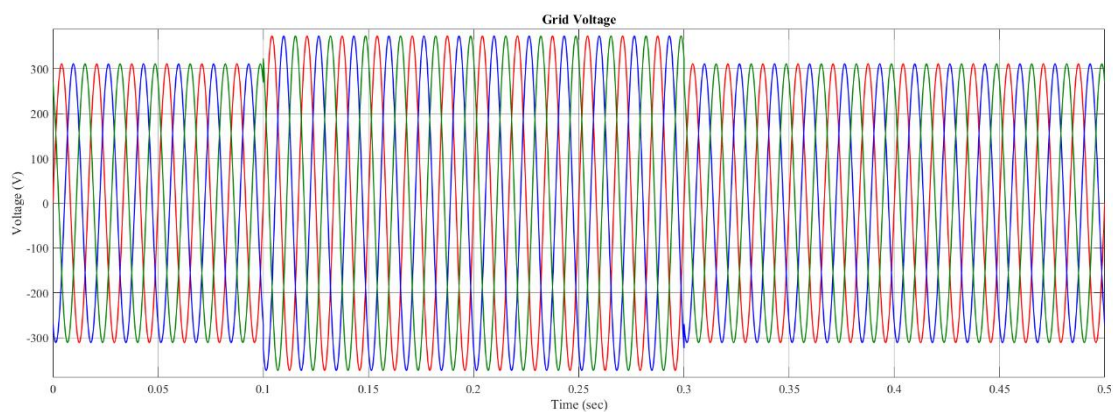


圖 4-13、三相電壓驟升電源端電壓波形

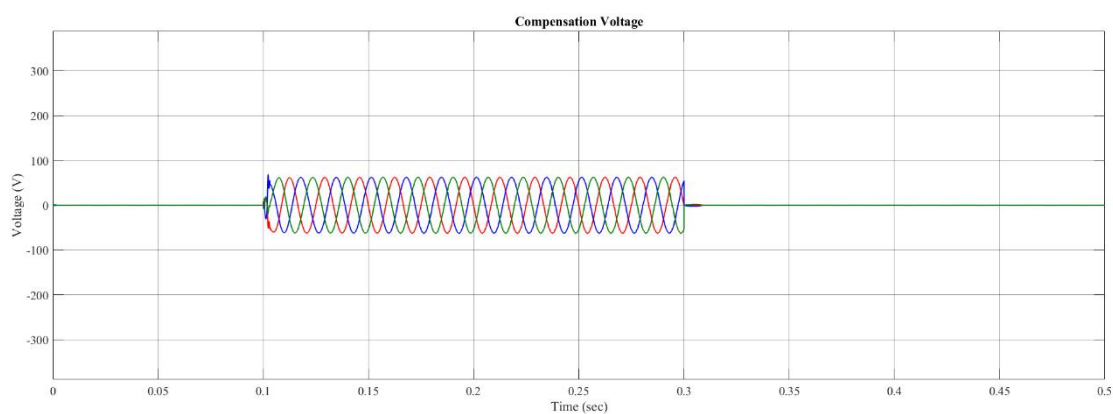


圖 4-14、三相電壓驟升系統注入補償電壓波形

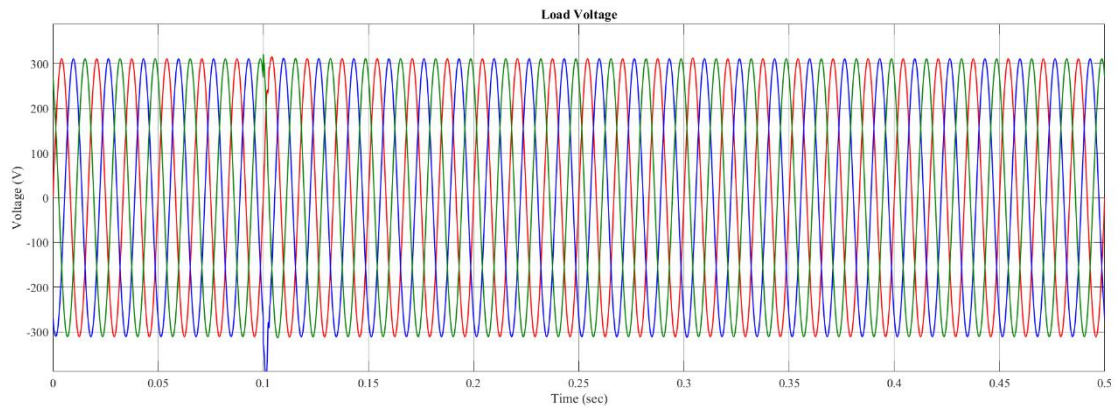


圖 4-15、三相電壓驟升負載端電壓波形

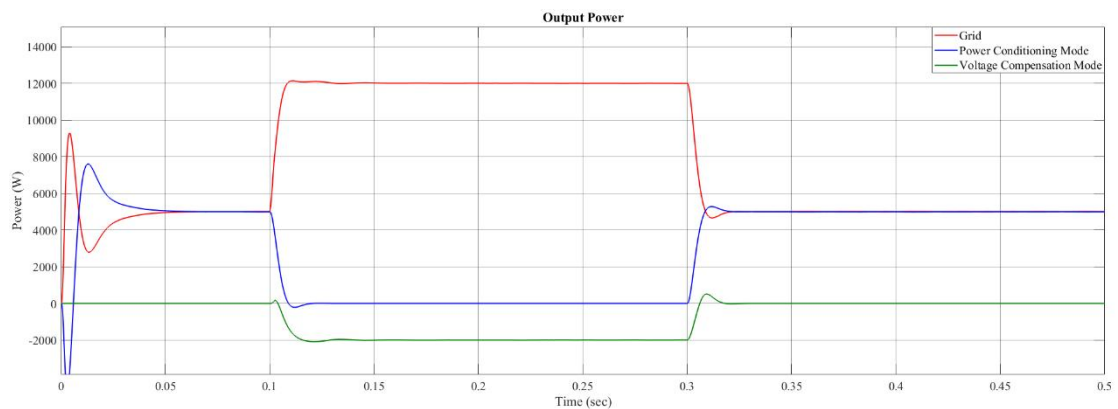


圖 4-16、三相電壓驟升電源端與系統模式切換輸出功率波型圖

圖 4-17 為本文系統於電壓驟升事件藉由負載端功率變化進行效能比較，本文提出之模糊派翠類神經網路(FNPN)與其他控制器於補償上的響應結果比較如下表 4-6 所示，可得知本文提出之模糊派翠類神經網路在電壓驟升事件的響應結果較佳。

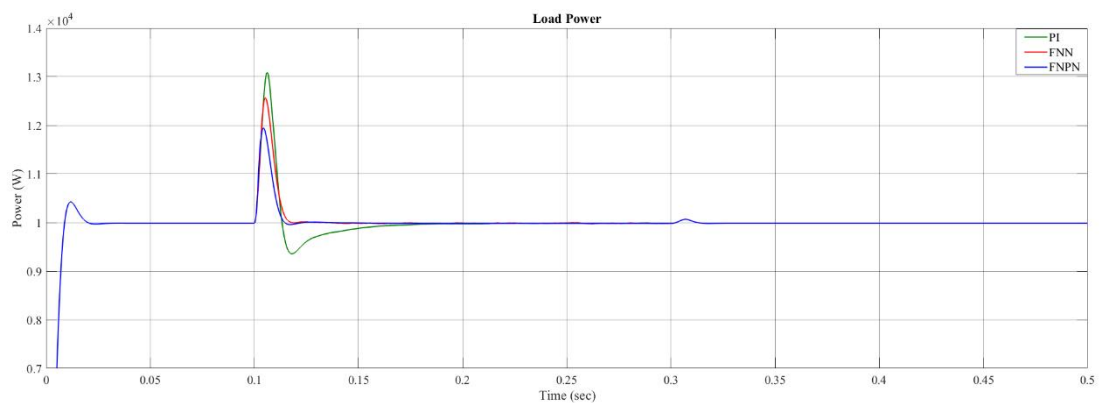


圖 4-17、三相電壓驟升負載端功率波型比較圖

表 4-6、三相電壓驟升控制器響應結果比較

控制方法	響應時間	最大超越量
PI	0.090(sec)	30.88(%)
FNN	0.041(sec)	25.64(%)
FNPN	0.035(sec)	19.44(%)

4. Case3 三相電壓不平衡

Case3 之模擬情境為三相電壓不平衡，如圖 4-18 所示電源端電壓於 0.1~0.3 秒時發生單相之電壓驟降，此時系統輸出之補償電壓則如圖 4-19，補償後之負載端電壓波形則如圖 4-20，可看出本文系統使用之控制法可有效解決電壓不平衡時產生的相位估測錯誤的問題，使系統輸出正確的補償電壓值維持負載電壓波形。

由圖 4-21 則可以看出本文之系統在電壓不平衡事件也能有效執行模式切換，當電源端正常供電時，系統處於功率調節模式並根據命令值輸出 5 kW 實功率至負載，而電壓不平衡事件發生系統轉為電壓補償模式輸出單相補償電壓，故其補償之瞬時功率為一震盪波形，系統於不平衡事件結束後則又轉為功率調節模式根據命令值提供功率。

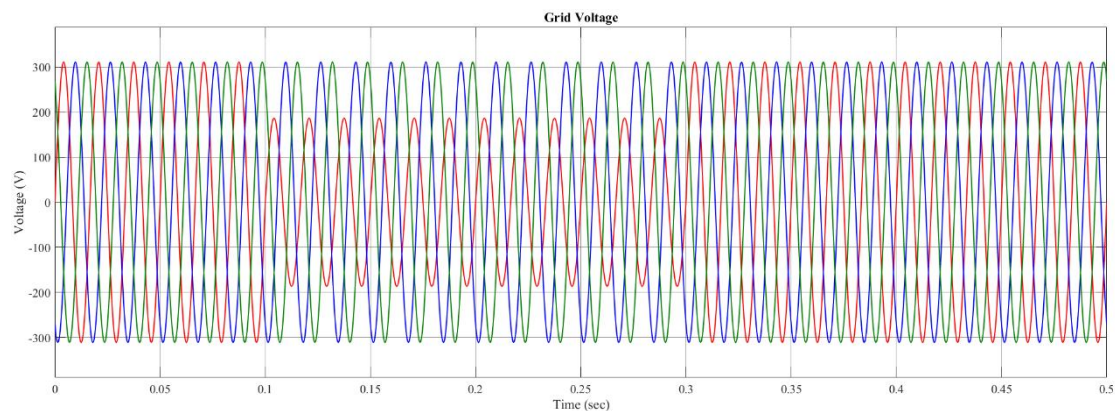


圖 4-18、三相電壓不平衡電源端電壓波形

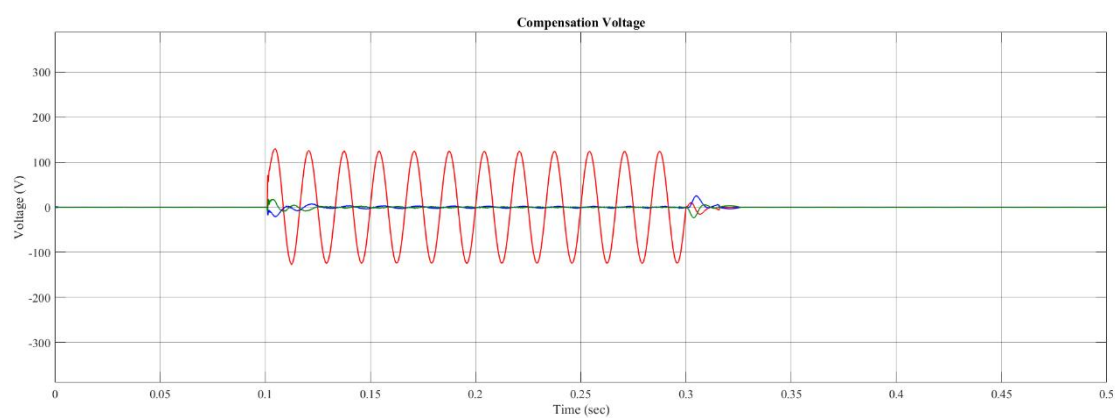


圖 4-19、三相電壓不平衡系統注入之補償電壓波形

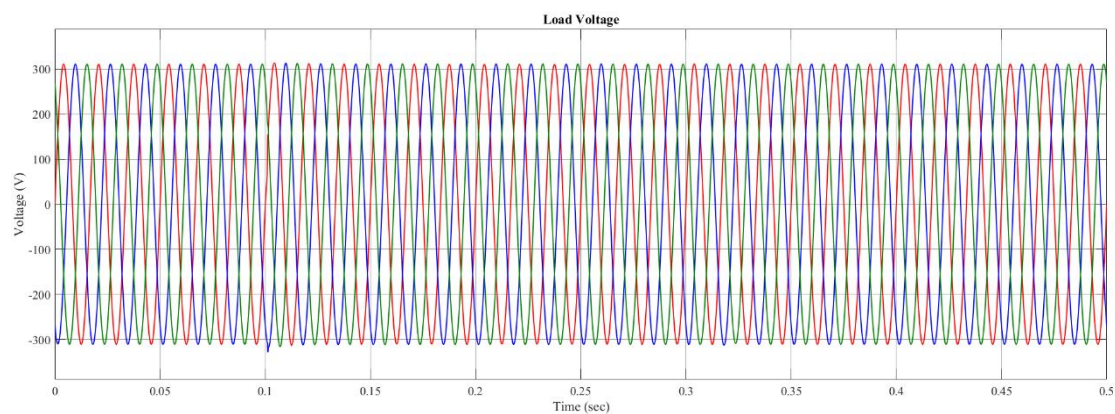


圖 4-20、三相電壓不平衡負載端電壓波形

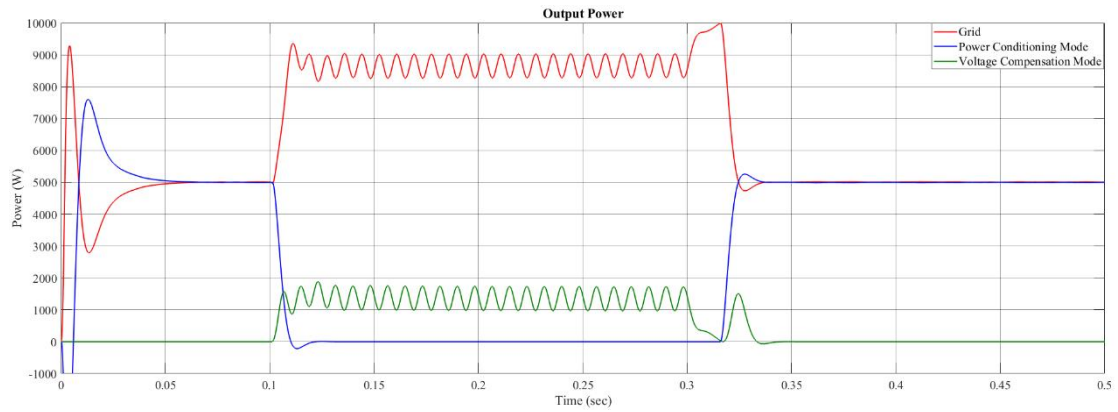


圖 4-21、三相電壓不平衡電源端與系統模式切換輸出功率波型圖

圖 4-22 為電壓不平衡事件時，計算負載端電壓不平衡率(VUF)以比較控制器效能，可看出本文系統可有效降低負載端之電壓不平衡率。而本文提出之模糊派翠類神經網路(FNPN)與其他控制器於電壓不平衡事件補償上的響應結果比較如下表 4-7，可得知本文提出之模糊派翠類神經網路在電壓不平衡事件之暫態響應時間與其他控制器相差不大，而穩態時之電壓不平衡率(VUF)則較低。

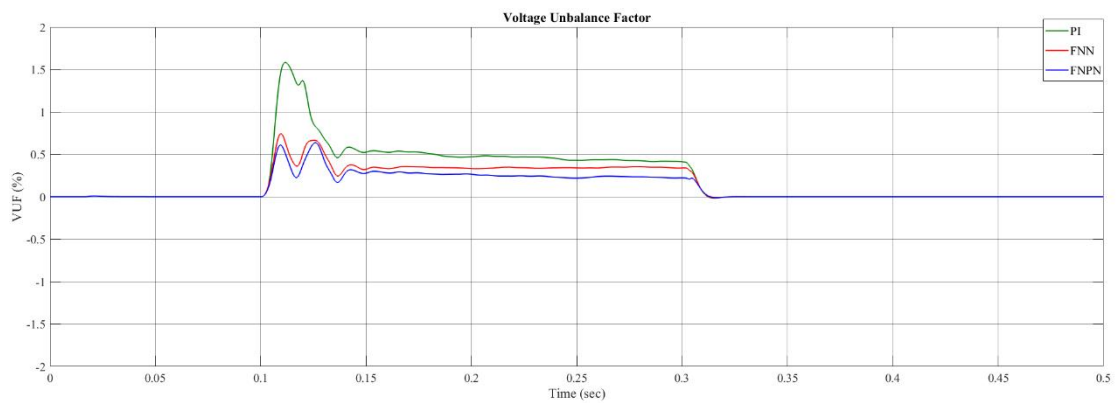


圖 4-22、負載端電壓不平衡率波型圖

表 4-7、三相電壓不平衡控制器響應結果比較

控制方法	響應時間	電壓不平衡率
PI	0.142(sec)	0.431(%)
FNN	0.081(sec)	0.348(%)
FNPN	0.101(sec)	0.231(%)

5. Case4 電壓閃爍

Case4 之模擬情境為電壓閃爍，如圖 4-23 所示電源端於 0.1~0.3 秒時發生電壓閃爍事件，此時系統輸出之補償電壓則如圖 4-24，負載端補償後之電壓波形則如圖 4-25。

由圖 4-26 可以看出本文系統在電壓閃爍事件也能有效執行模式切換，當電源端正常供電時，系統處於功率調節模式並根據命令值輸出 5 kW 實功率至負載，而當閃爍事件發生時，系統轉為電壓補償模式並因應閃爍發生過程向輸電線路注入或吸收功率，以抑制電壓閃爍造成的擾動，而系統於電壓閃爍事件結束後轉回功率調節模式持續根據命令值提供負載功率。

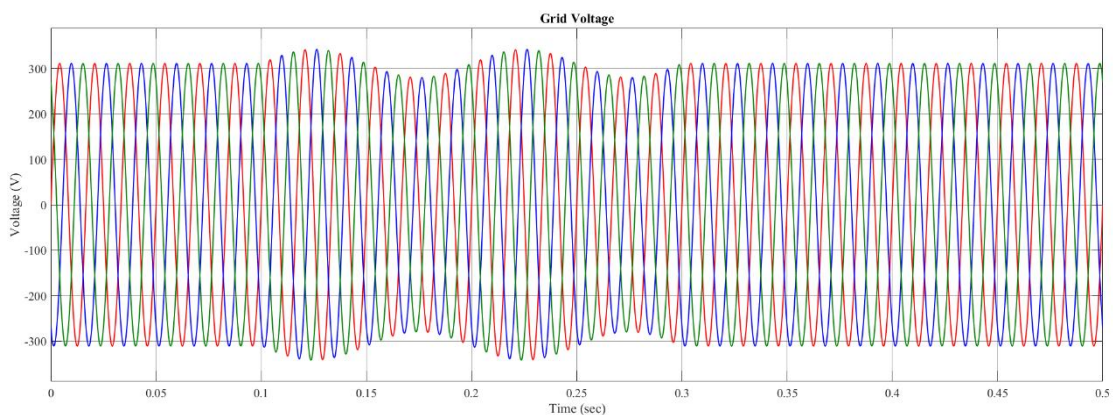


圖 4-23、電壓閃爍電源端電壓波形

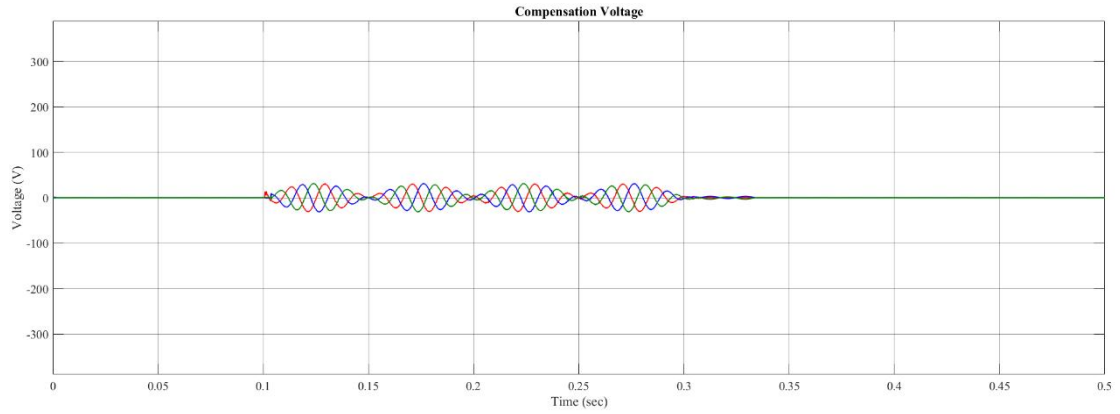


圖 4-24、電壓閃爍系統注入補償電壓波形

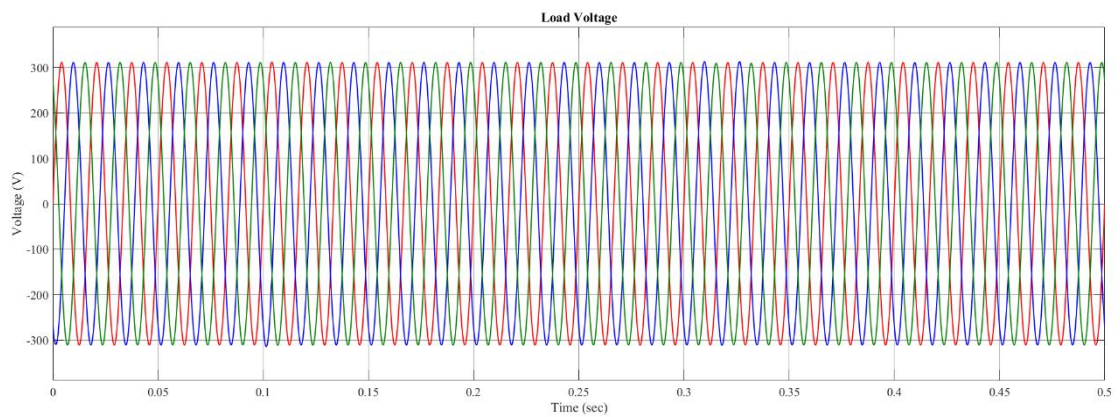


圖 4-25、電壓閃爍負載端電壓波形

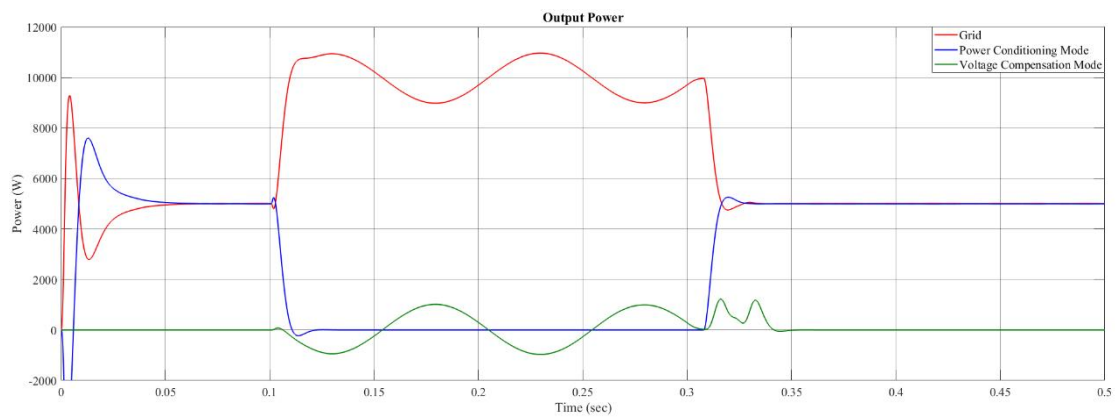


圖 4-26、電壓閃爍電源端與系統模式切換輸出功率波型圖

圖 4-27 為電壓閃爍事件時，透過計算負載端閃爍指標 ΔV_{10} 進行系統效能比較，可看出本文系統可有效抑制負載端 ΔV_{10} 值。而本文提出之模糊派翠類神經網路(FNPN)與其他控制器於電壓閃爍事件的補償響應結果比較如下表 4-8，可得知本文提出之模糊派翠類神經

網路在電壓閃爍之暫態響應時間優於其他控制器，且穩態時之閃爍指標 Δ_{10} 與傳統 PI 控制器相比也較低。

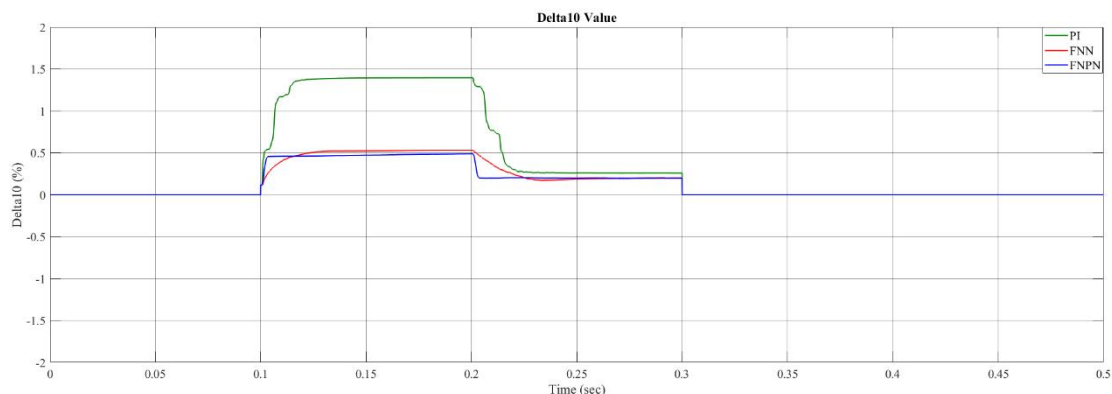


圖 4-27、負載端 ΔV_{10} 波型圖

表 4-8、電壓閃爍控制器響應結果表較

控制方法	響應時間	閃爍指標 ΔV_{10}
PI	0.145(sec)	0.26(%)
FNN	0.165(sec)	0.20(%)
FNPN	0.104(sec)	0.19(%)

6. Case5 電壓諧波汙染

Case5 之模擬情境為電壓諧波汙染，如圖 4-28 所示電源端於 0.1~0.3 秒時受到以 5、7 次諧波為主之電壓汙染，此時系統輸出之補償電壓則如圖 4-29，負載端補償後之電壓波形則如圖 4-30。

由圖 4-31 可看出本文系統能夠有效降低總諧波失真值(THD)，而本文提出之模糊派翠類神經與其他控制器在負載端上的補償結果與頻譜分析比較如圖 4-32、圖 4-33 與圖 4-34，並將其動態響應時間與結果整理如表 4-9，可以看出本文提出之模糊派翠類神經網路 THD

低於其他控制器，且在事件發生時暫態響應速度也較快。

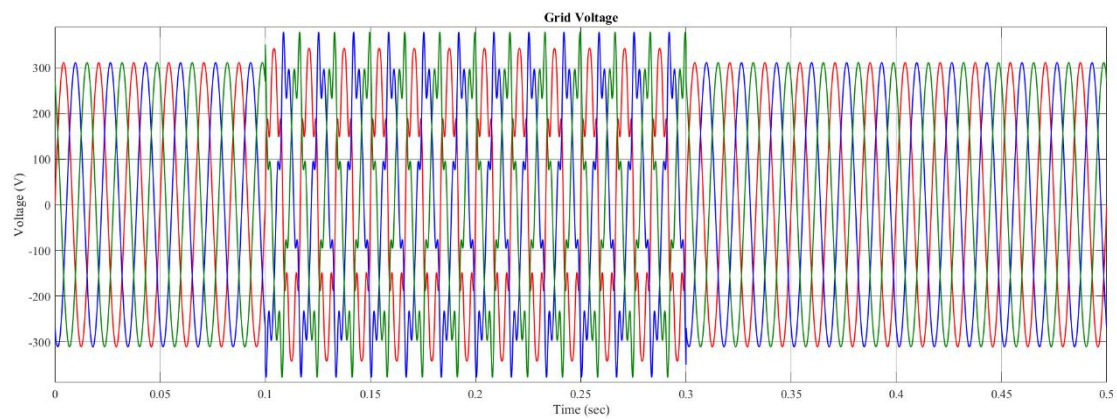


圖 4-28、電壓諧波污染電源端電壓波形

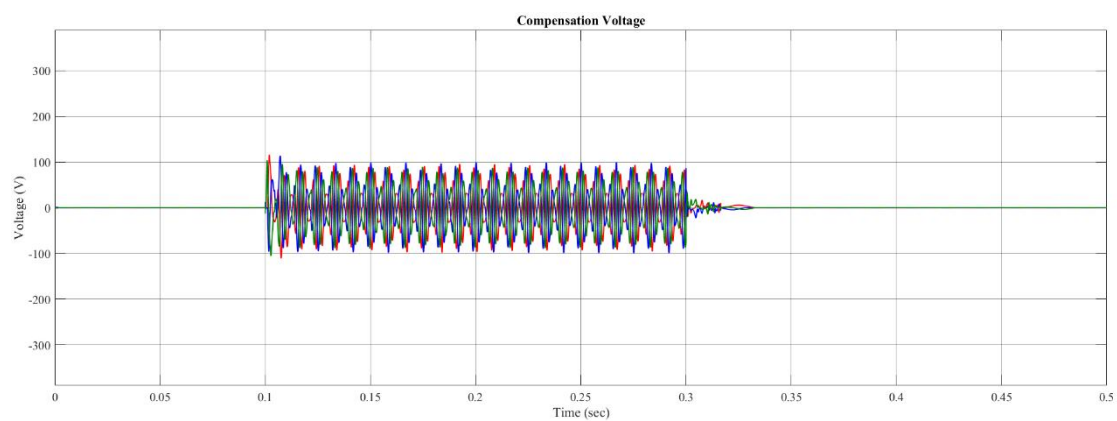


圖 4-29、電壓諧波污染注入補償電壓波形

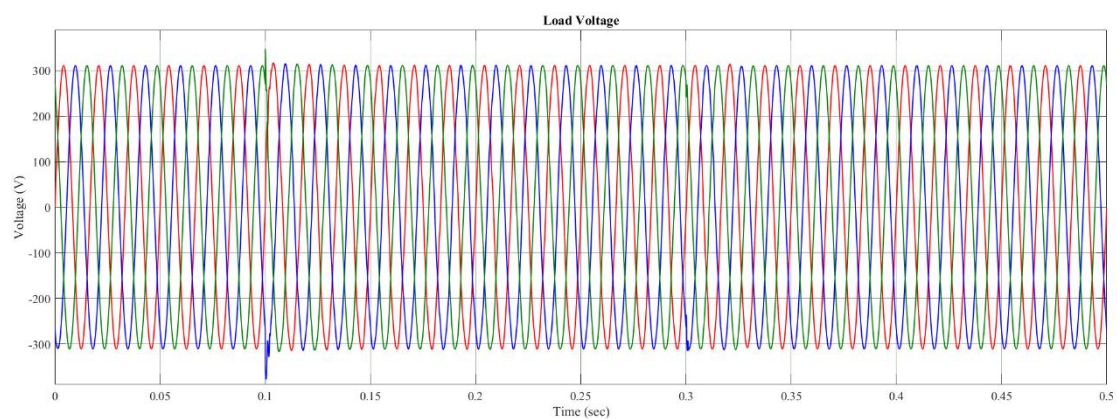


圖 4-30、電壓諧波污染負載端電壓波形

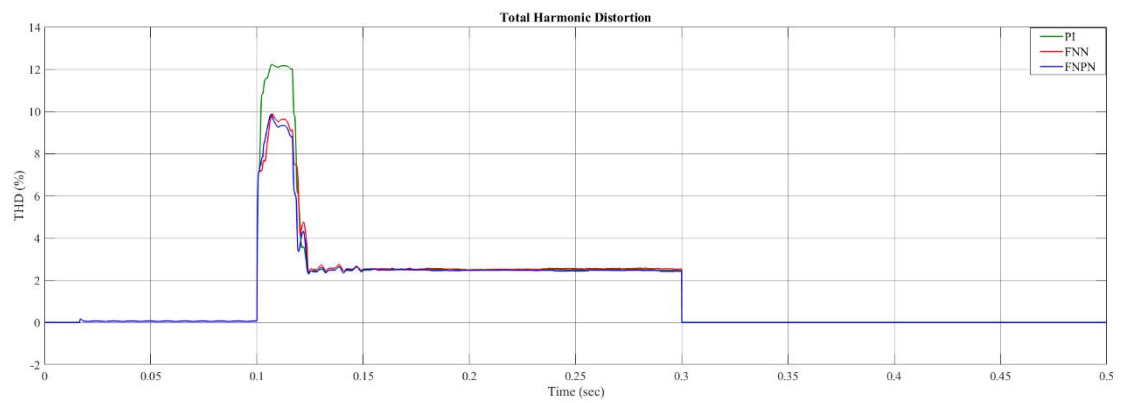


圖 4-31、電壓諧波污染負載端 THD 比較

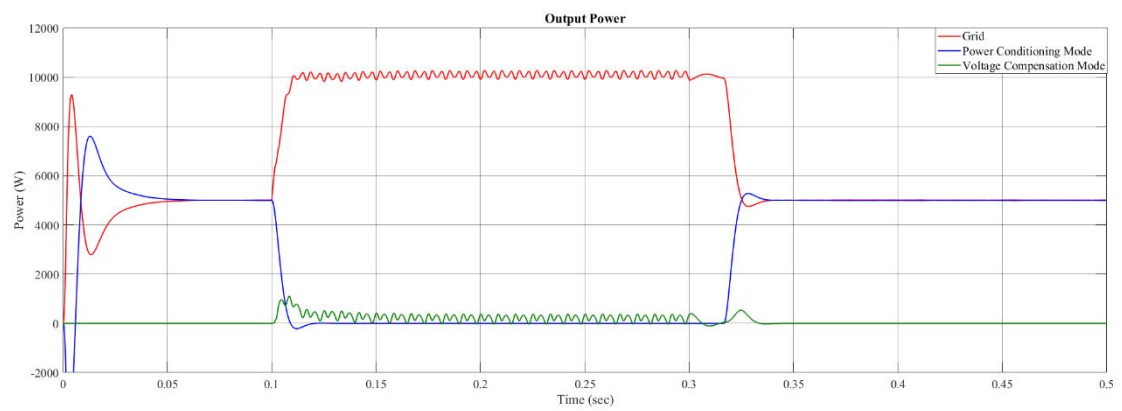


圖 4-32、電壓諧波污染電源端與系統模式切換輸出功率波型圖

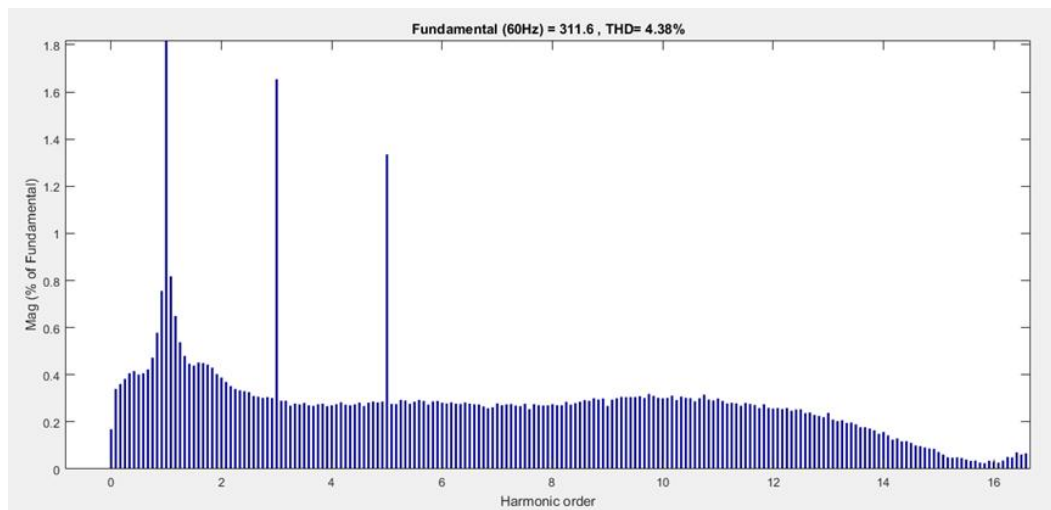


圖 4-33、PI 控制補償後負載端 THD

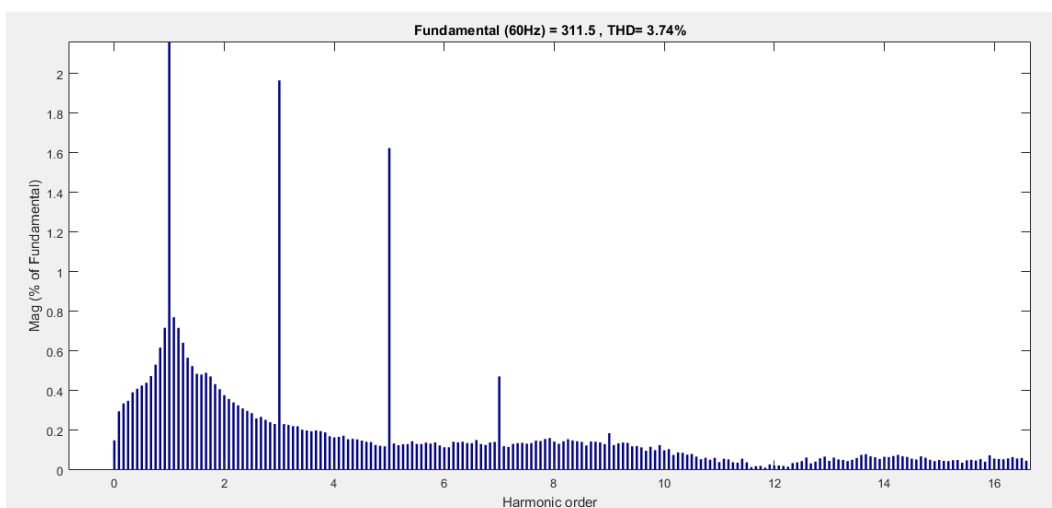


圖 4-34、FNN 控制補償後負載端 THD

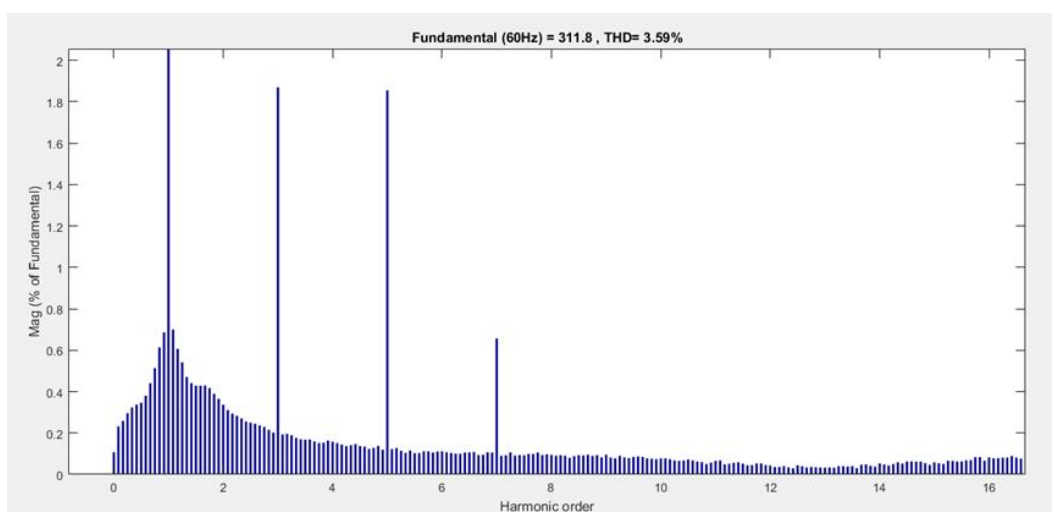


圖 4-35、FNPN 控制補償後負載端 THD

表 4-9、電壓諧波污染控制器響應結果表較

控制方法	響應時間	總諧波失真(THD)
PI	0.026(sec)	4.38(%)
FNN	0.024(sec)	3.74(%)
FNPN	0.024(sec)	3.59(%)

7. Case6 電源端電力中斷

Case6 之模擬情境為電源端發生電力中斷，如圖 4-36 所示電源

端於 0.2 秒時發生電力中斷事件，因此本文系統切換為不斷電系統模式以維持負載運作，圖 4-37 為電力中斷事件時負載端電壓波形。

圖 4-38 可以看出本文系統在電力中斷事件發生後由功率調節模式轉為不斷電系統模式，當電源端正常供電時，系統處於功率調節模式根據命令值輸出 5 kW 實功率至電網，而當電力中斷事件發生後，系統轉為不斷電系統模式改為輸出 10 kW 功率。

另外，由圖 4-39 負載端之功率波型圖也可看出電力中斷發生時有瞬間之功率驟降，其後則持續維持負載所需之功率，而本文提出之模糊派翠類神經網路與其他控制器之響應結果比較則如表 4-10 所示。

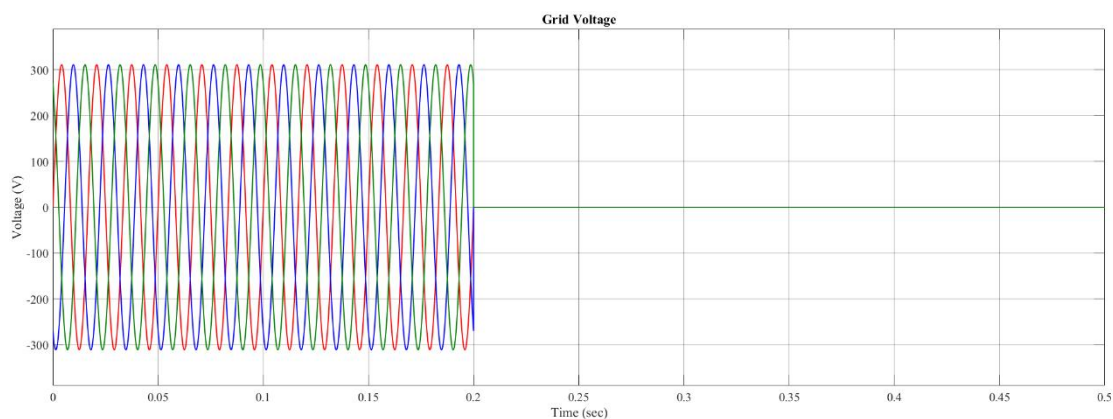


圖 4-36、電力中斷電源端電壓波形

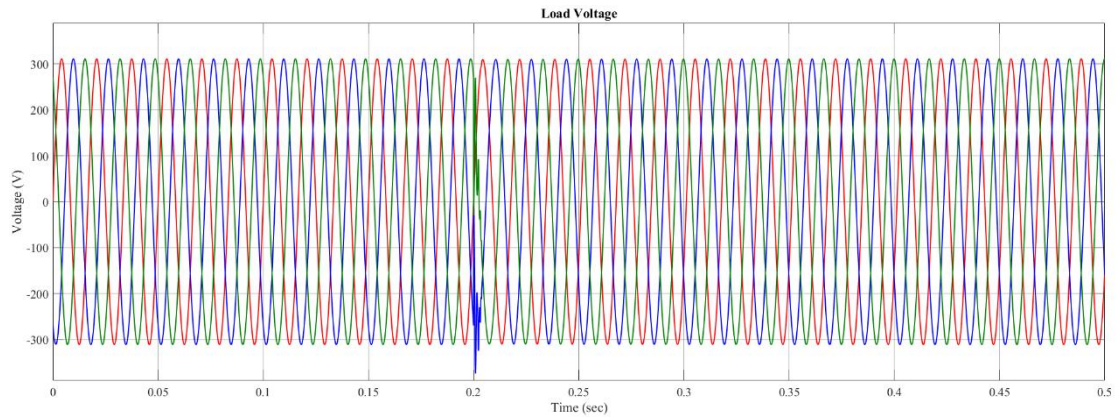


圖 4-37、電力中斷負載端電壓波形

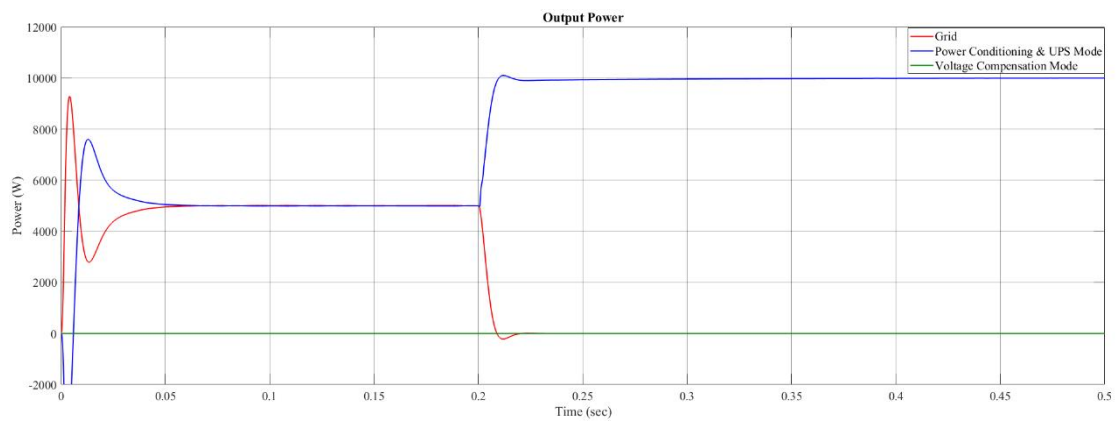


圖 4- 38、電力中斷電源端與系統模式切換輸出功率波型圖

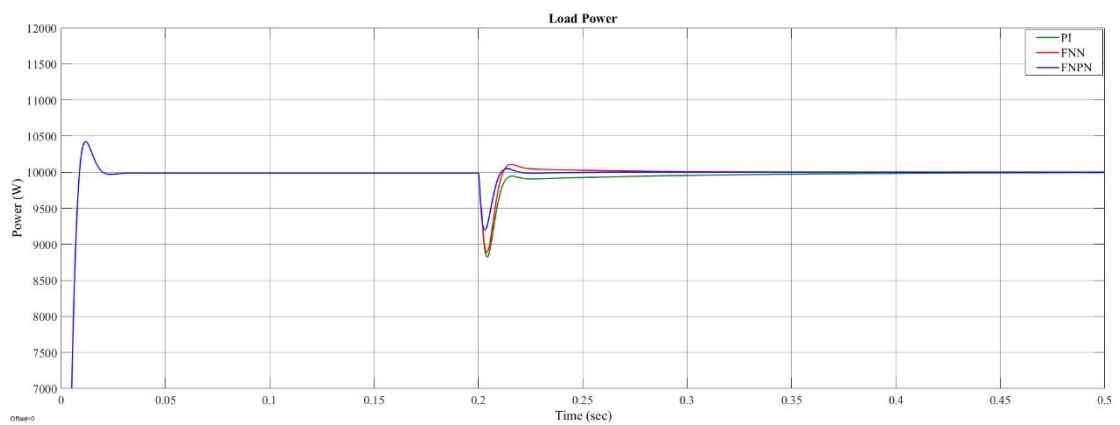


圖 4-39、電力中斷負載端功率波型圖

表 4-10、電源端電力中斷控制器響應結果比較

控制方法	響應時間
PI	0.31(sec)
FNN	0.15(sec)
FNPN	0.07(sec)

由本章節所有模擬情境可以得知本文系統在面臨不同的電力事件時皆能有效執行模式切換，且三種模式之控制法均能正確執行工作。另外，也可以看出本文系統在電壓補償模式上能夠補償大部分之電力品質事件，藉由不同的情境分析與比較得知本文提出之模糊派翠類神經網路在電壓補償上的動態響應結果皆優於其他控制器。

五、應用在核能所即時模擬系統 OPAL-RT(軟體版本為 RT-Lab 2019.2 及 Matlab 2018b)進行前述模型實測

本節透過即時模擬系統 OPAL-RT 進行本計畫所提多模式漸進式輔助電力調節策略之性能驗證。

(一) Case1 三相電壓驟降

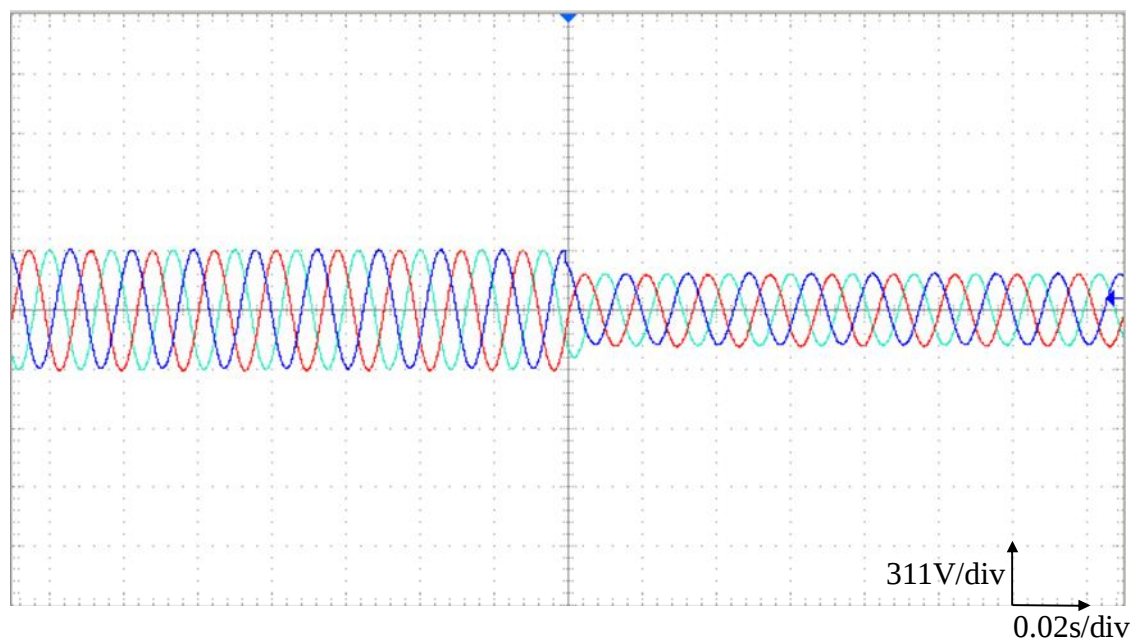


圖 5-1、三相電壓驟降電源端電壓波形

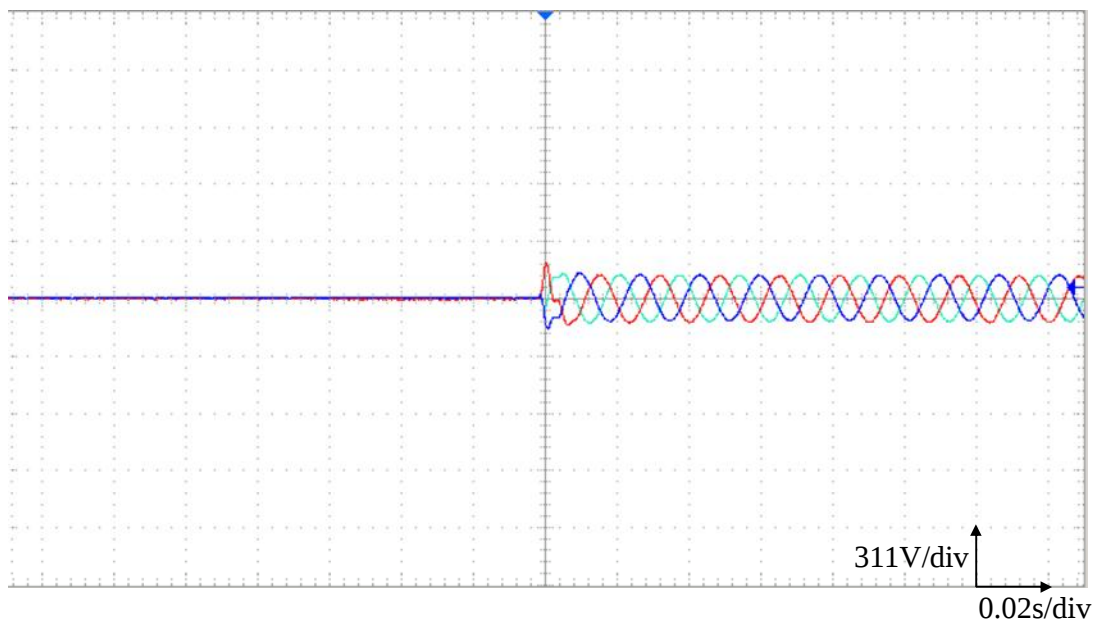


圖 5-2、三相電壓驟降系統注入補償電壓波形

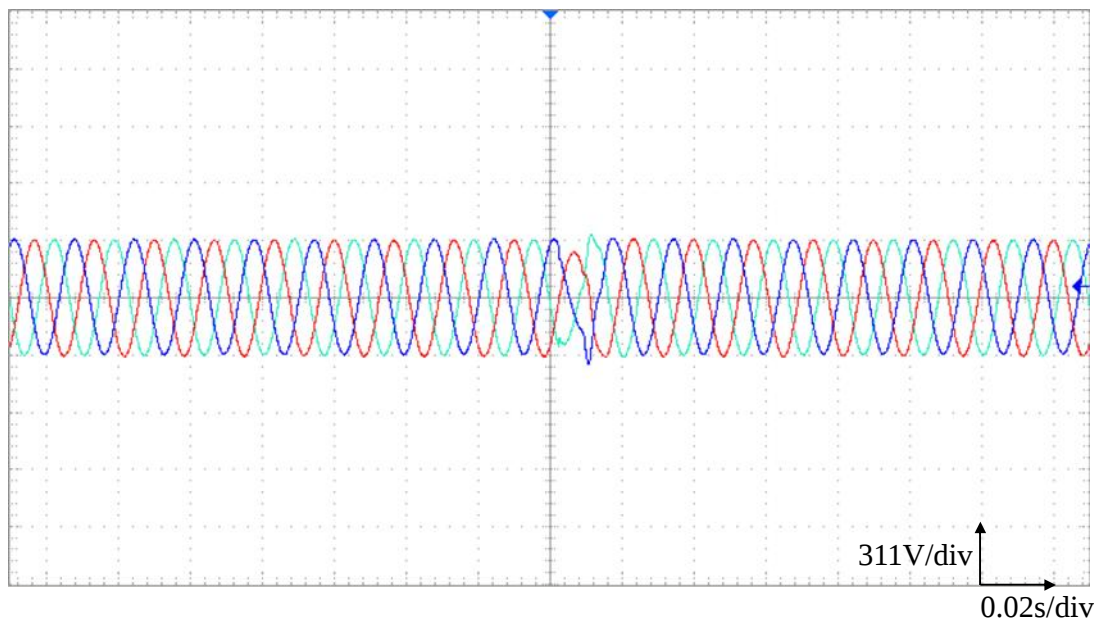


圖 5-3、三相電壓驟降負載端電壓波形

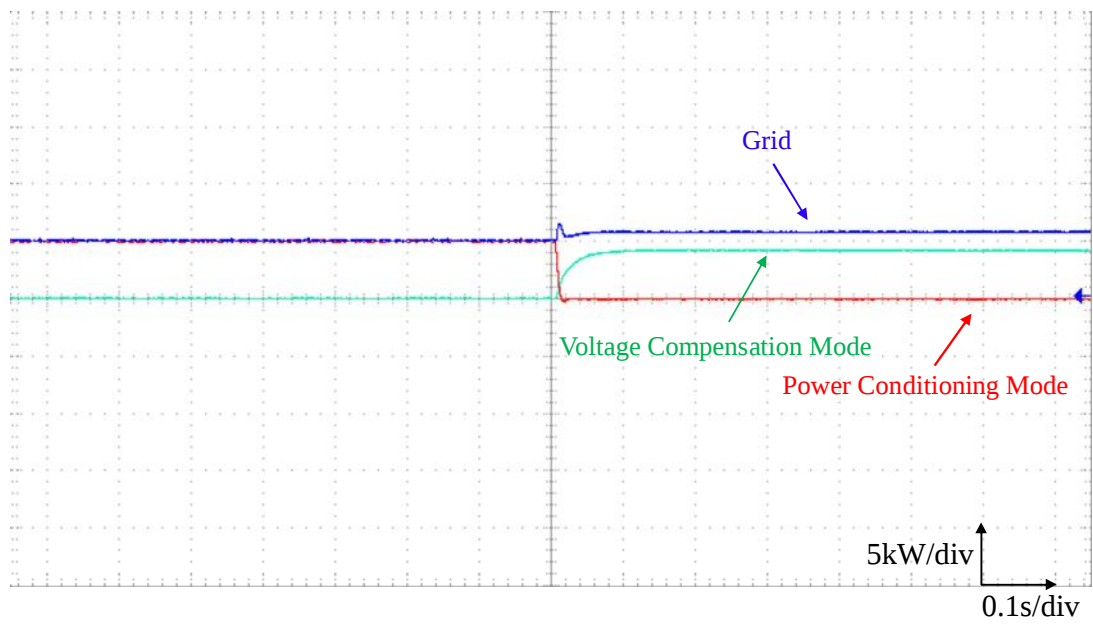


圖 5-4、三相電壓驟降電源端與系統模式輸出功率波形

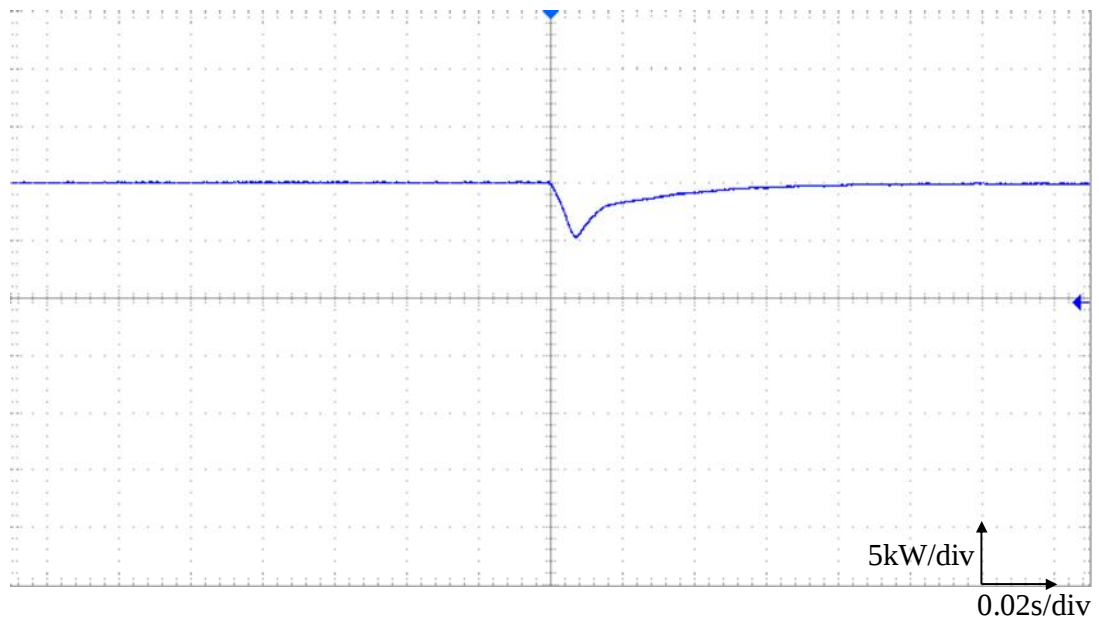


圖 5-5、三相電壓驟降 PI 控制器負載端功率響應

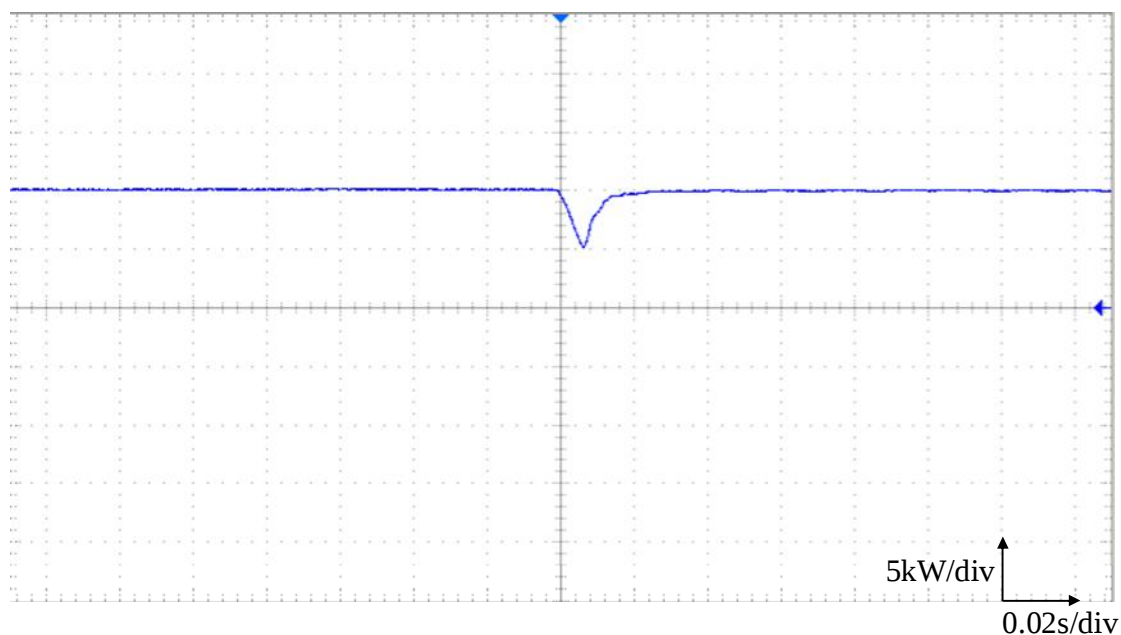


圖 5-6、三相電壓驟降 FNNP 控制負載端功率響應

由圖 5-1 至圖 5-3 可看出當發生三相電壓驟降時，負載端電壓能夠有效地獲得補償，並且由圖 5-4 可看出本文系統能有效執行模式切換並分別輸出命令功率值與補償功率值，再由圖 5-5 與圖 5-6 驗證了本文提出之模糊派翠類神經(FNNP)其響應較佳，能使負載端更快速地恢復至額定功率。

(二) Case2 三相電壓驟升

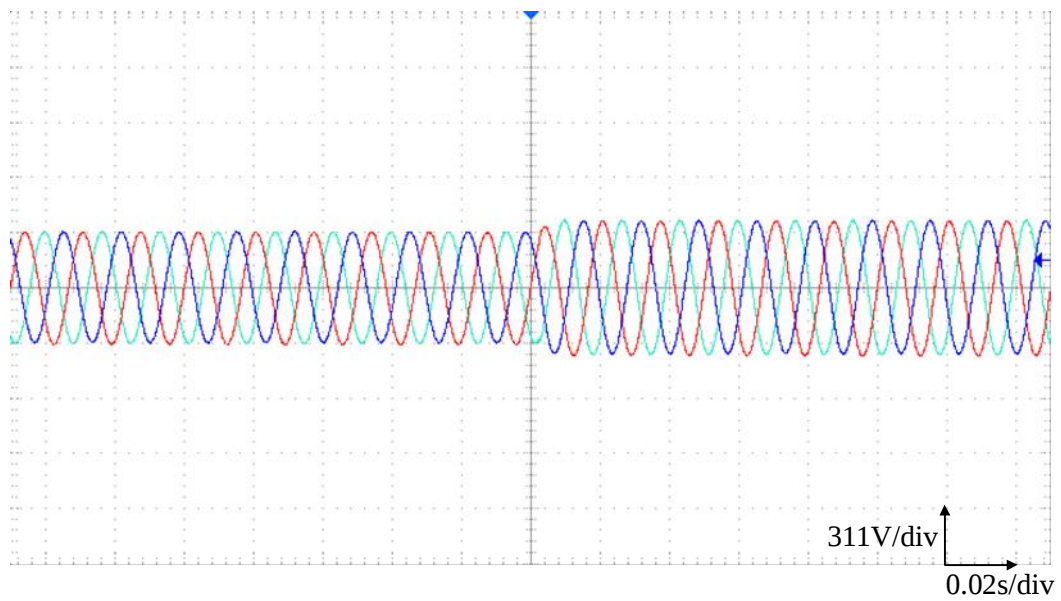


圖 5-7、三相電壓驟升電源端電壓波形

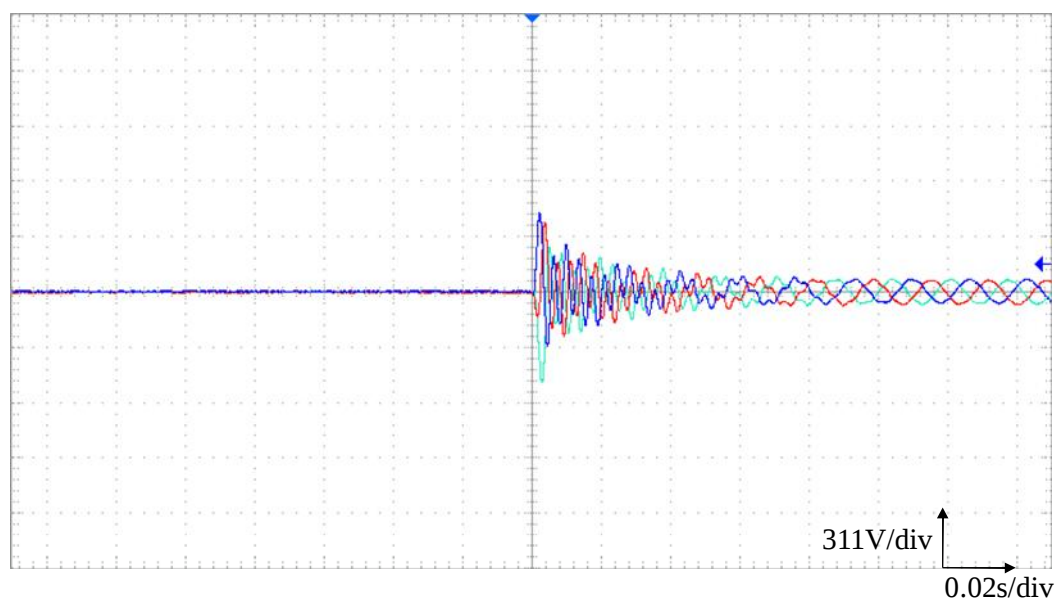


圖 5-8、三相電壓驟升系統注入補償電壓波形

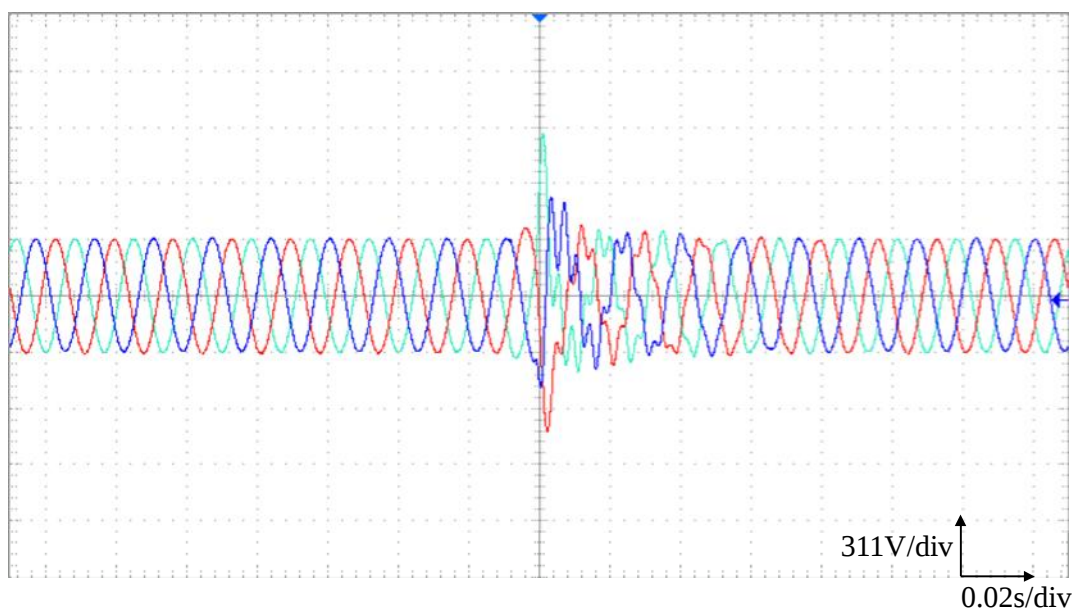


圖 5-9、三相電壓驟升負載端電壓波形

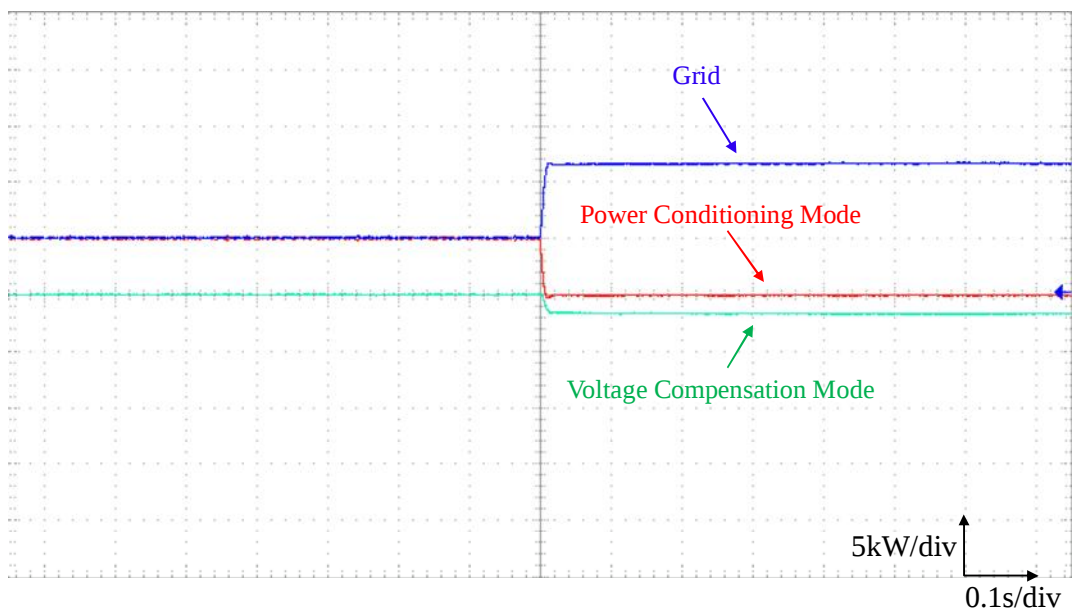


圖 5-10、三相電壓驟升電源端與系統模式切換輸出功率波形

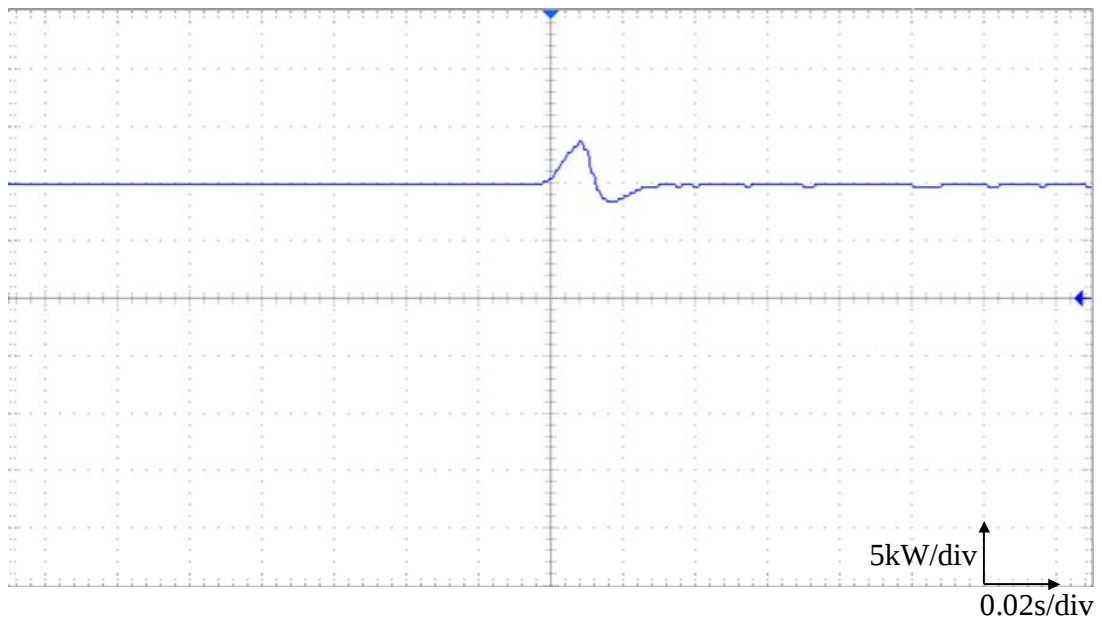


圖 5-11、三相電壓驟升 PI 控制器負載端功率響應

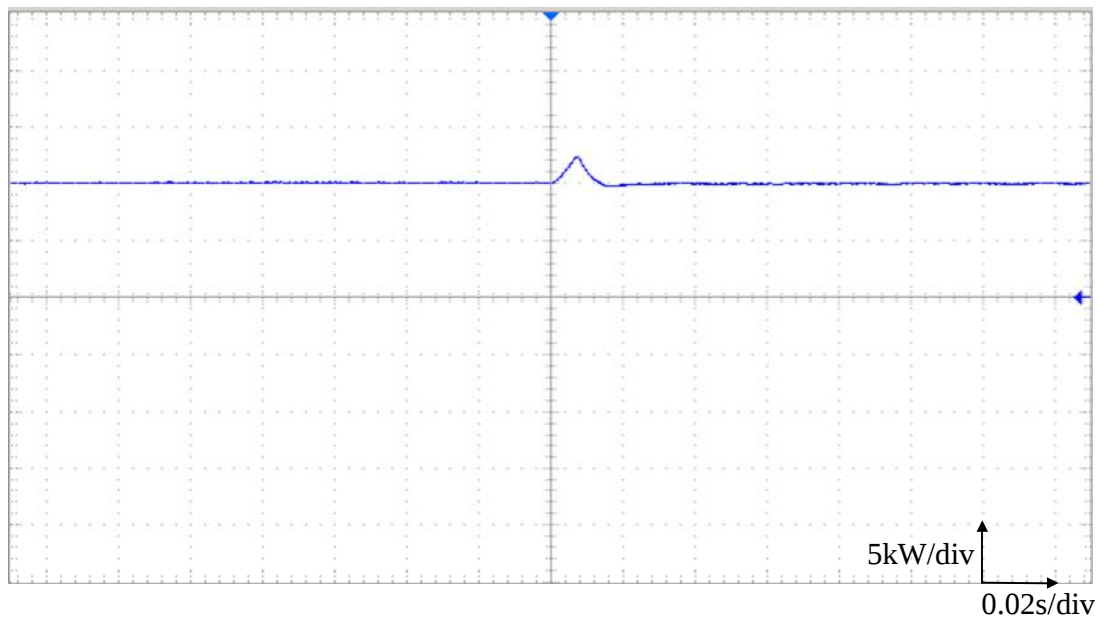


圖 5-12、三相電壓驟升 FNPN 控制負載端功率響應

由圖 5-7 至圖 5-9 可看出負載端電壓在三相電壓驟升期間能夠有效地維持在額定電壓，圖 5-10 則可看出本文系統在驟升前後透過模式切換輸出命令功率與補償功率，圖 5-11 與圖 5-12 驗證了本文提出

之模糊派翠類神經網路(FNPN)其暫態響應較佳，負載端之最大超越量較低且恢復速度較快。

(三) Case3 三相電壓不平衡

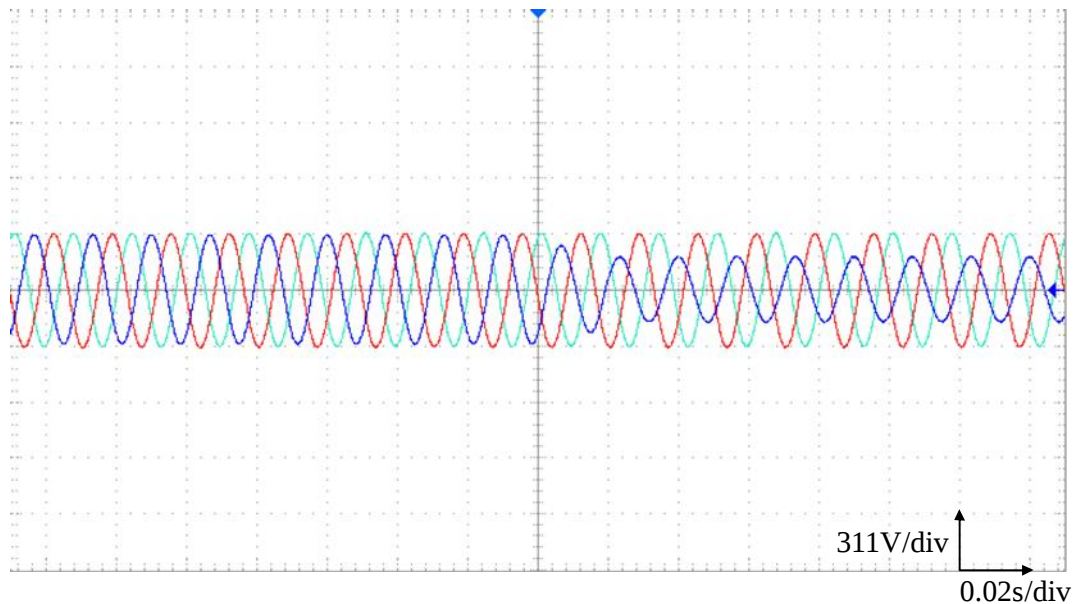


圖 5-13、三相電壓不平衡電源端電壓波形

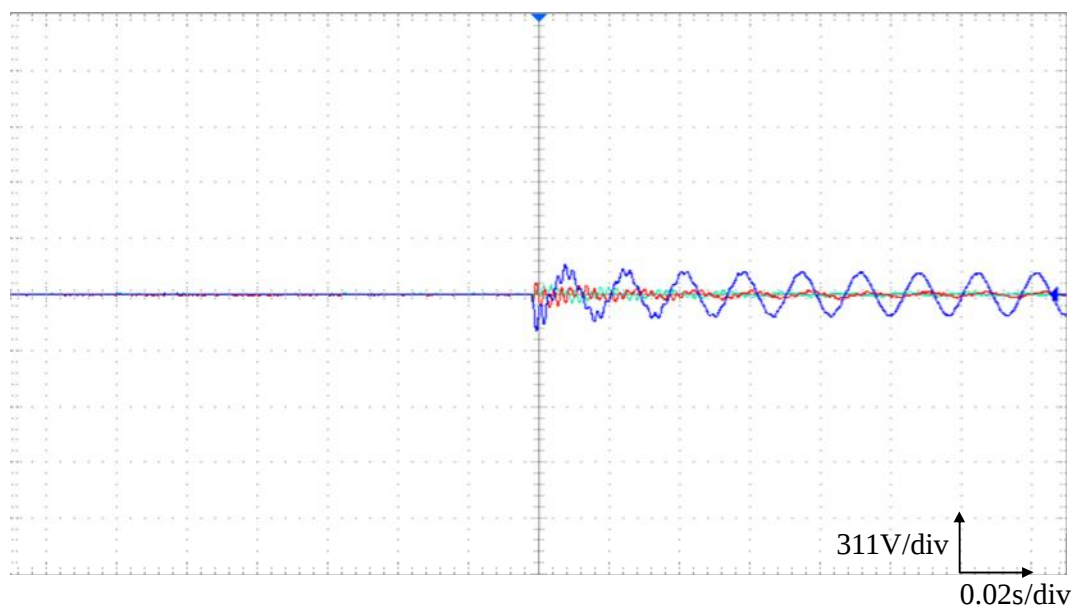


圖 5-14、三相電壓不平衡系統注入補償電壓波形

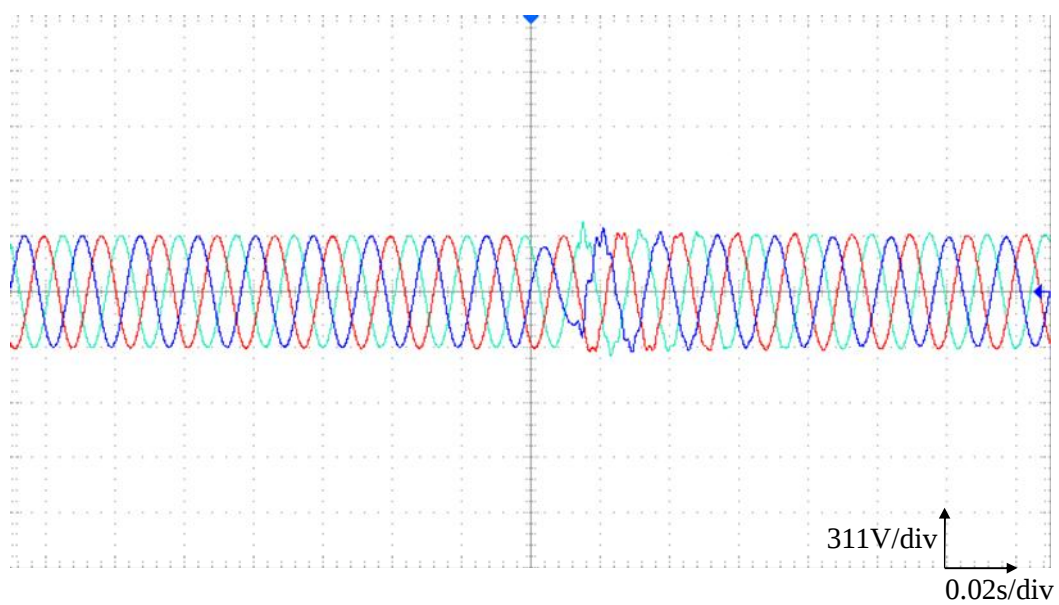


圖 5-15、三相電壓不平衡負載端電壓波形

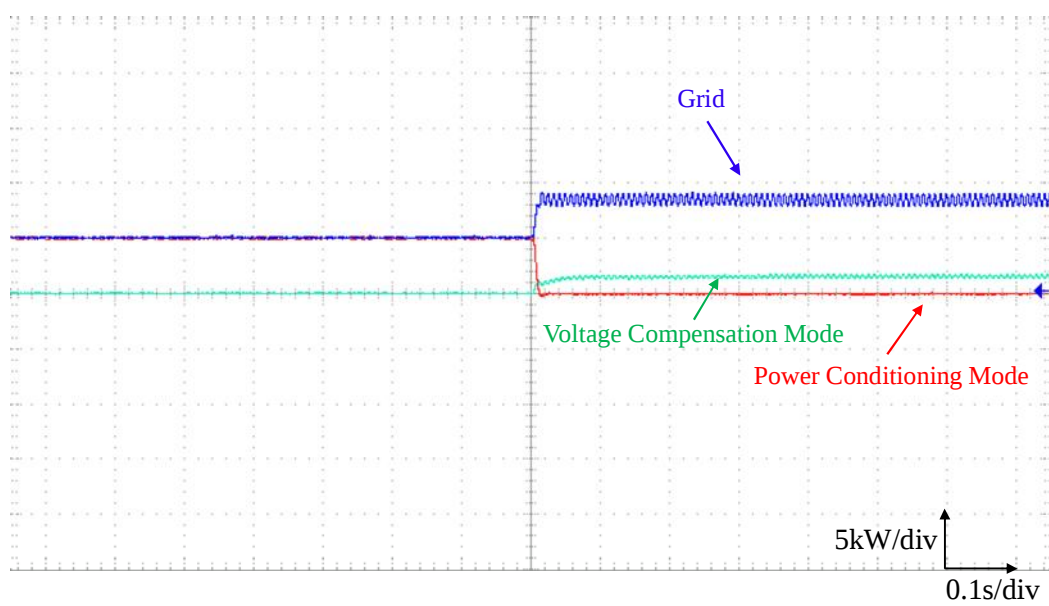


圖 5-16、三相電壓不平衡電源端與系統模式切換輸出功率波形

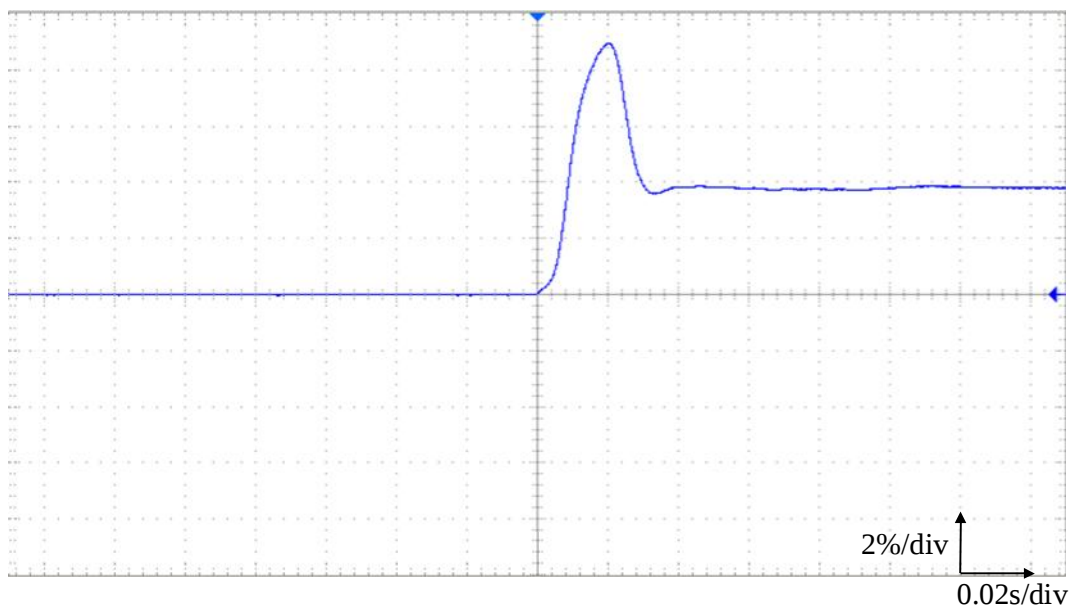


圖 5-17、PI 器控制負載端電壓不平衡率

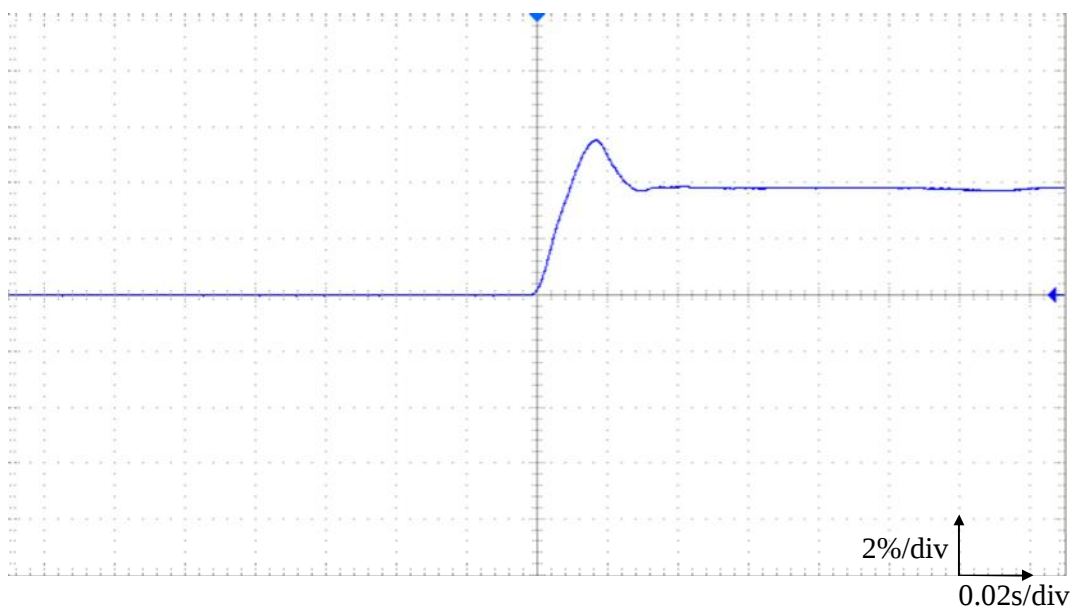


圖 5-18、FNPN 控制負載端電壓不平衡率

本文設計之三相電壓不平衡事件為單相電壓驟降，由圖 5-13 至圖 5-15 可看出本文使用之控制法可以正確計算補償電壓大小與相位，使負載端得到良好的補償結果，圖 5-16 能看出在面對不平衡事件時系統依然能正確執行模式切換輸出命令功率值與補償功率值至

輸配電線路，圖 5-17 與圖 5-18 驗證本文提出之模糊派翠類神經之暫態響應較佳，負載端之電壓不平衡率能更快獲得抑制。

(四) Case4 電壓閃爍

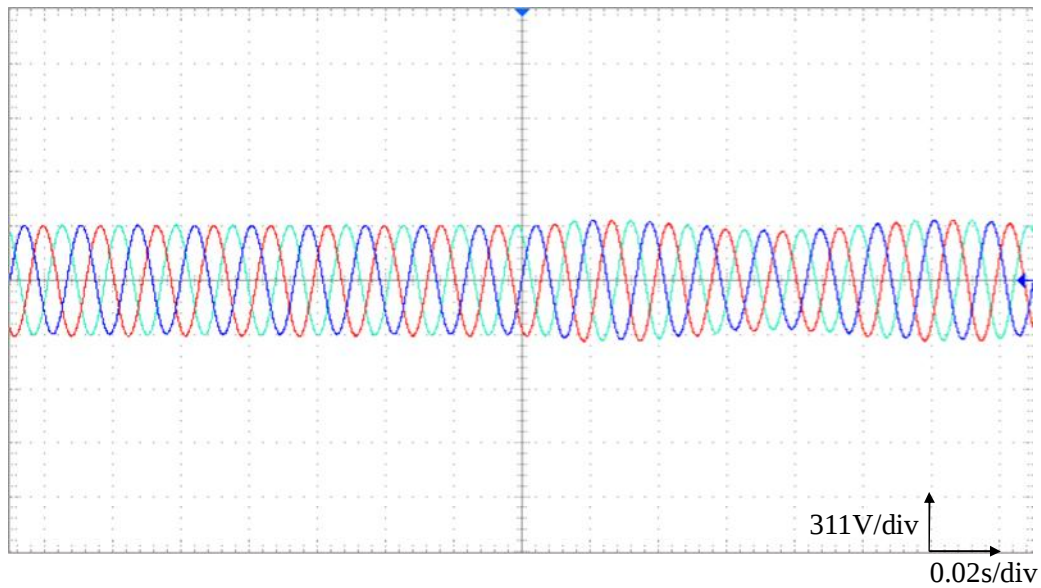


圖 5-19、電壓閃爍電源端電壓波形

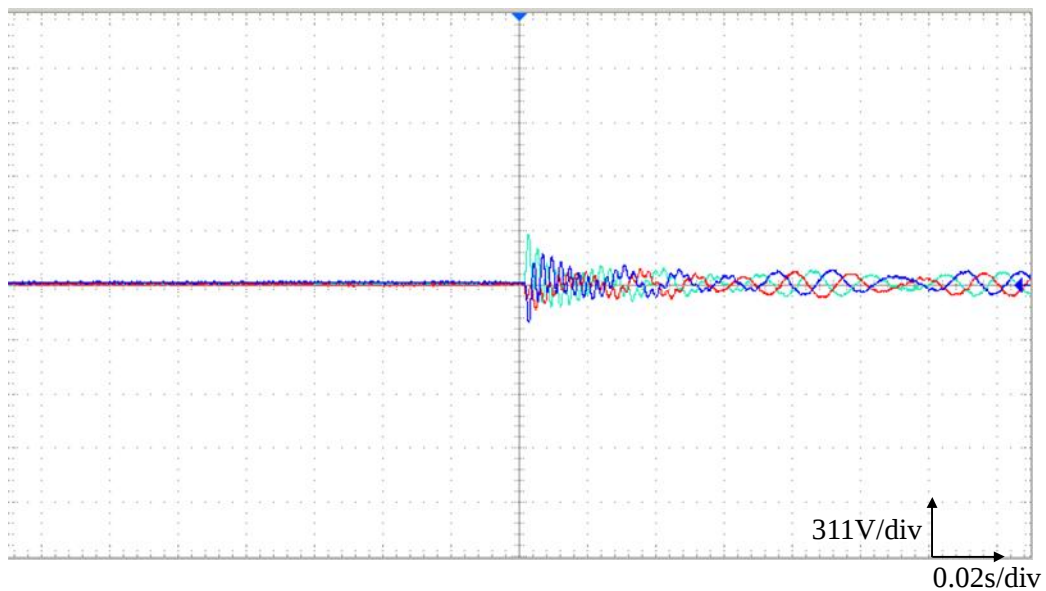


圖 5-20、電壓閃爍系統注入補償電壓波形

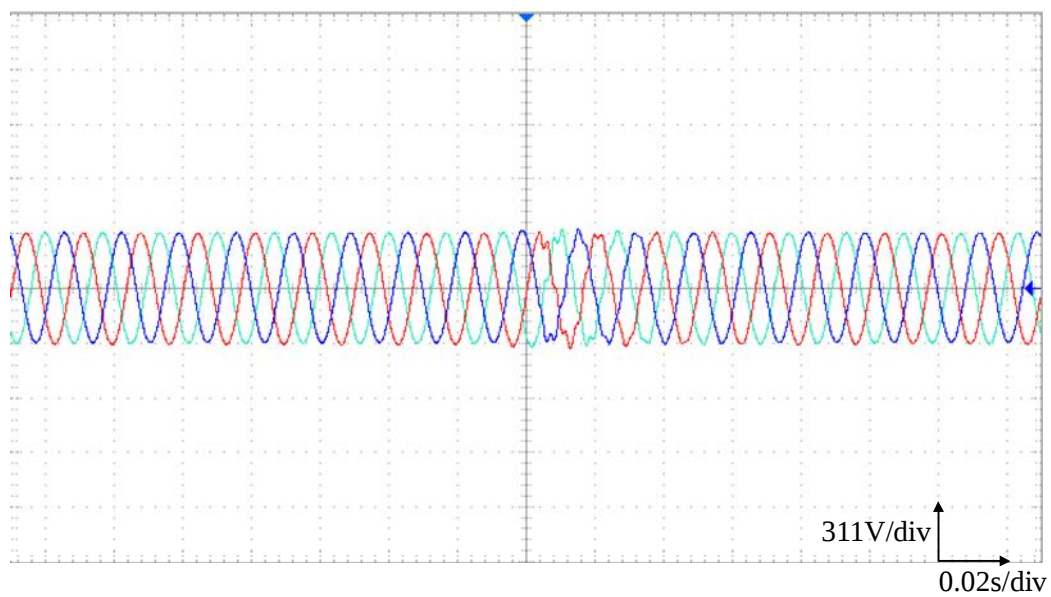


圖 5-21、電壓閃爍負載端電壓波形

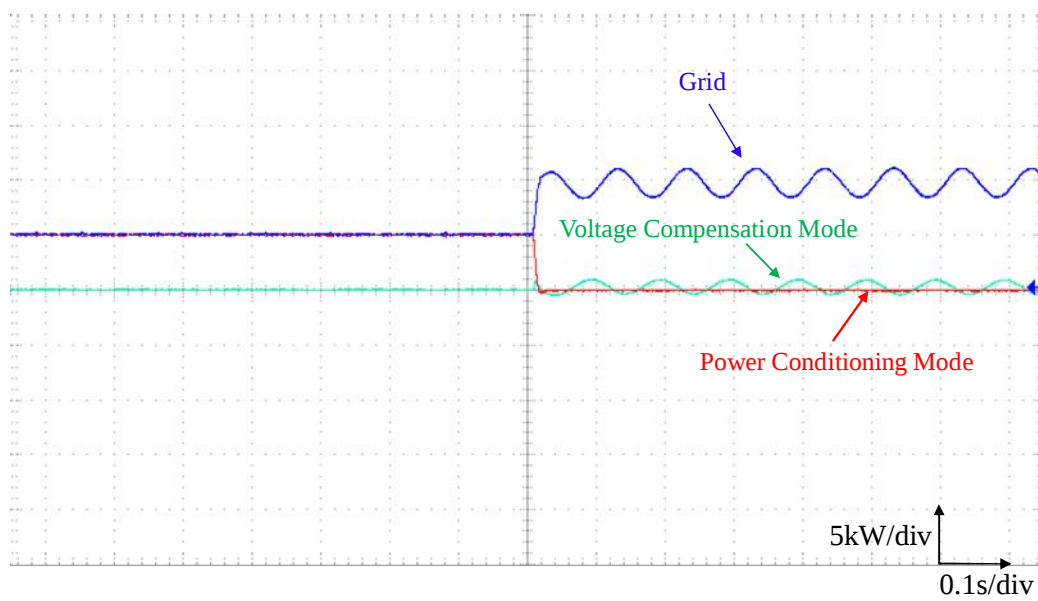


圖 5-22、電壓閃爍電源端與系統模式切換輸出功率波形

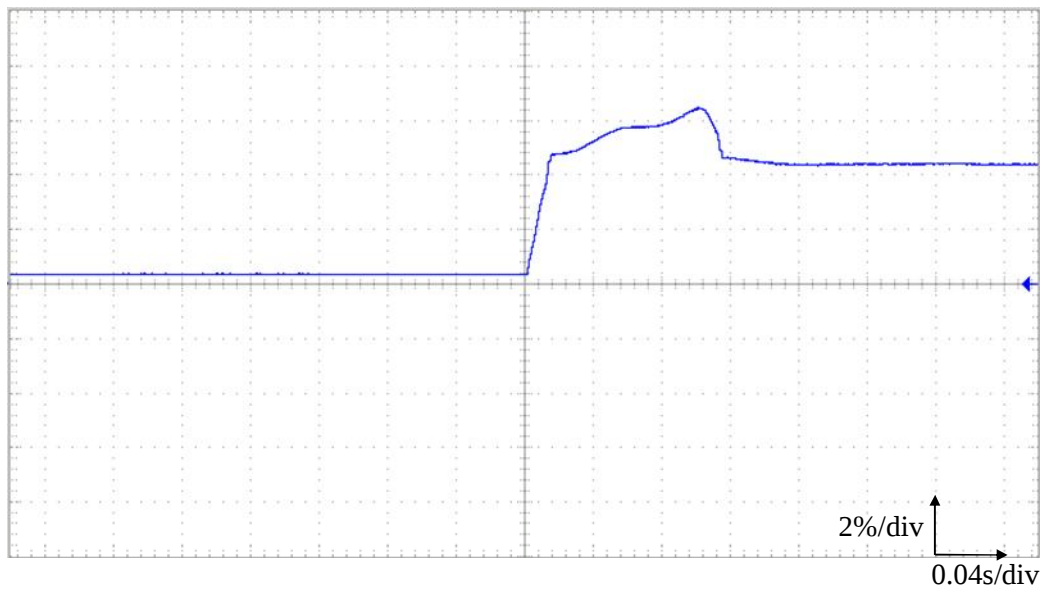


圖 5-23、PI 控制負載端 ΔV_{10} 指標值

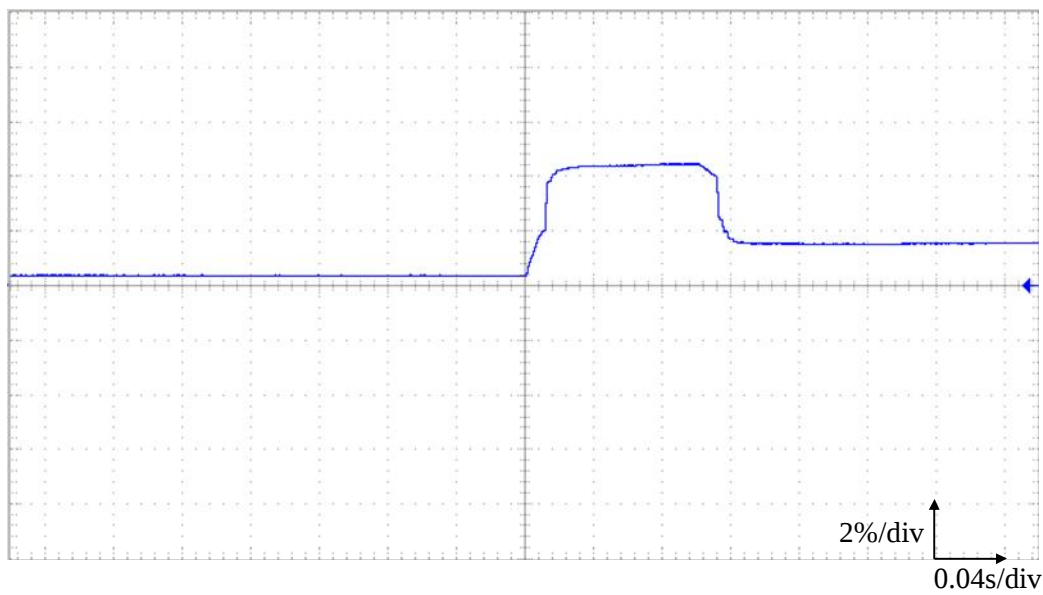


圖 5-24、FNPN 控制負載端 ΔV_{10} 指標值

由圖 5-19 至圖 5-21 可以看出本文系統在面對電壓閃爍事件時能夠有效改善電壓擾動的情形，使負載電壓維持正常波形，圖 5-22 則可看出系統能有效偵測閃爍事件並執行模式切換以輸出命令功率值

與補償功率值，圖 5-23 與圖 5-24 則驗證了本文之模糊派翠類神經之能更好的降低閃爍指標 ΔV_{10} 。

(五) Case5 電壓諧波污染

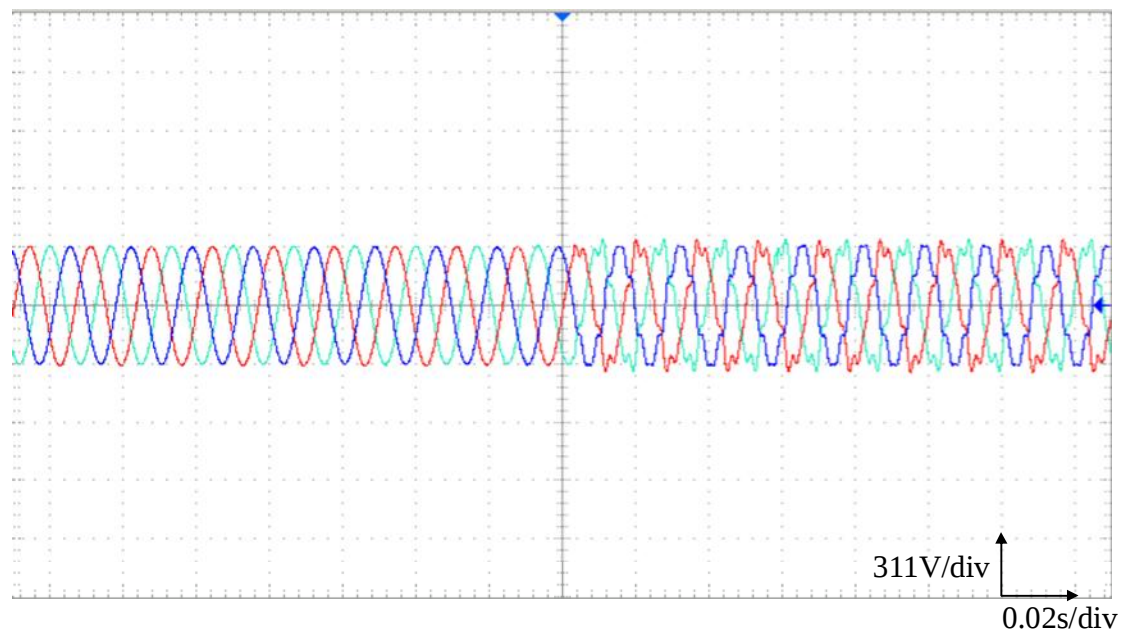


圖 5-25、電壓諧波污染電源端電壓波形

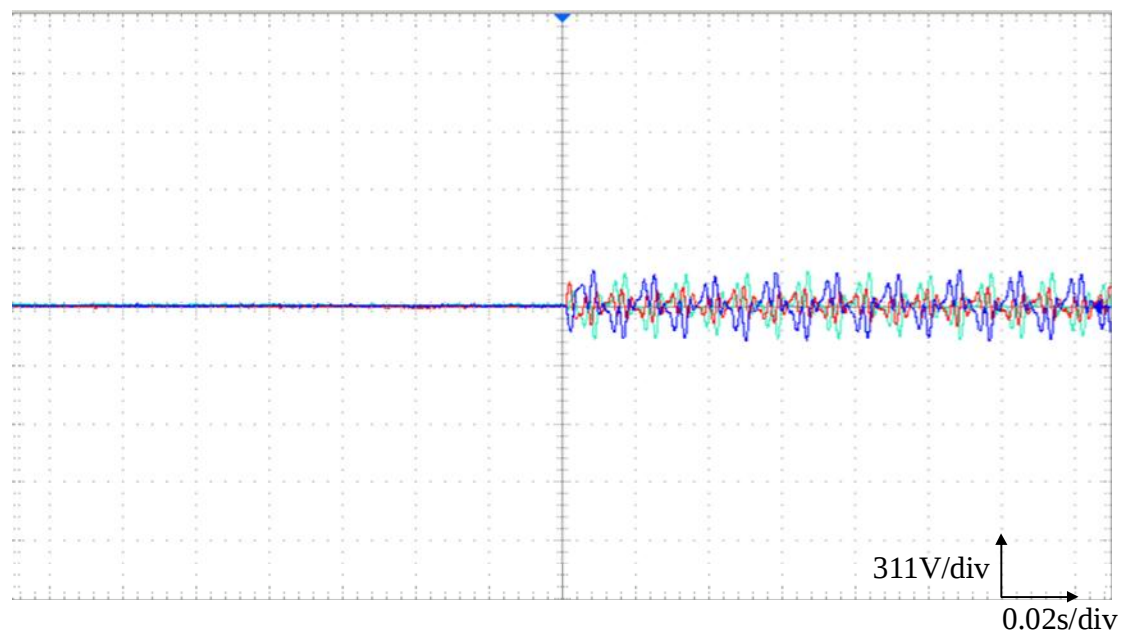


圖 5-26、電壓諧波污染系統注入補償電壓波形

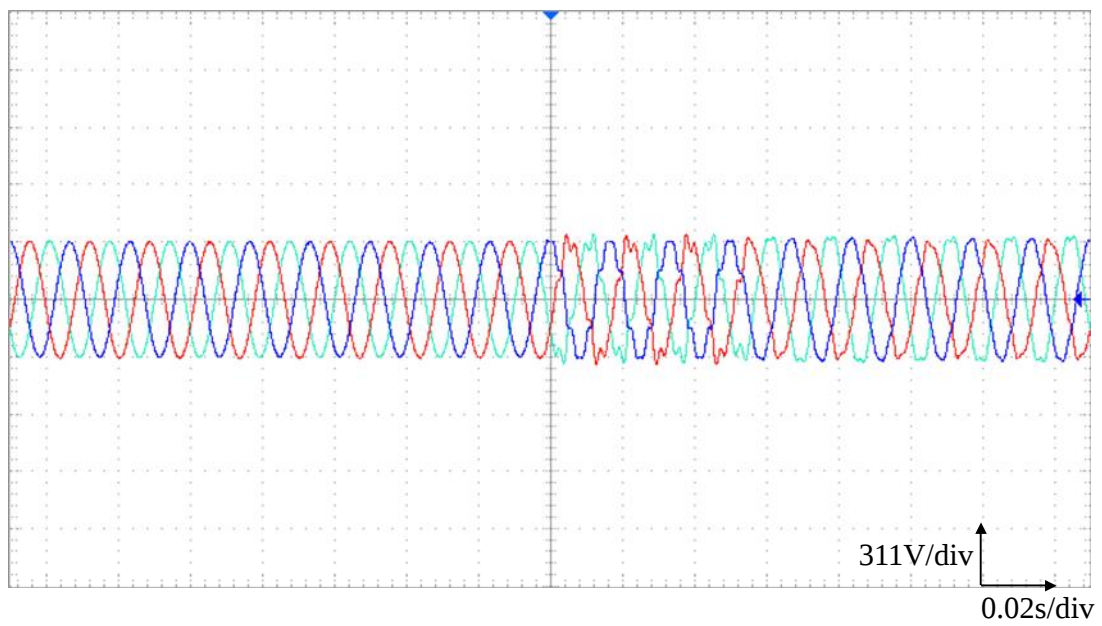


圖 5-27、電壓諧波污染負載端電壓波形

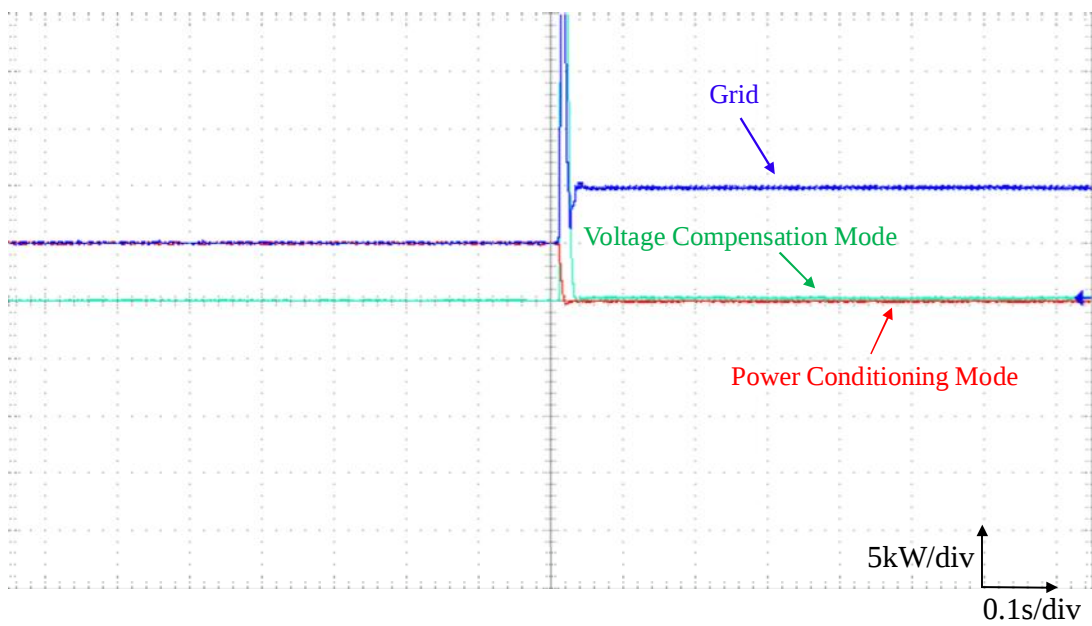


圖 5-28、電壓諧波污染電源端與系統模式切換輸出功率波形

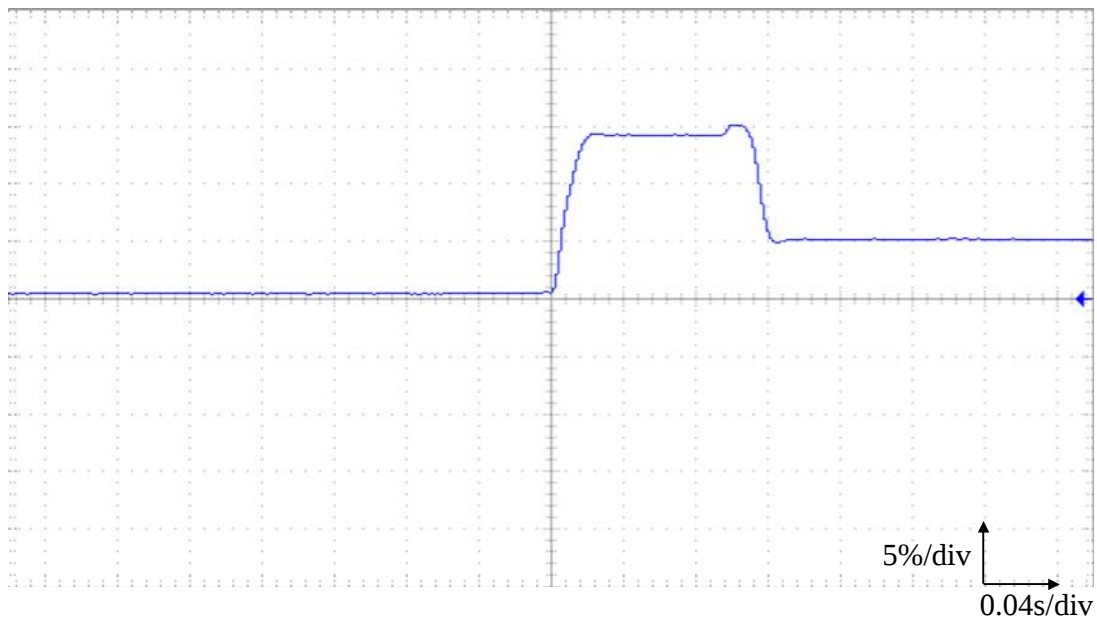


圖 5-29、PI 控制負載端 THD 值



圖 5-30、FNPN 控制負載端 THD 值

本文設計之電源端諧波汙染以常見的 5、7 次諧波成分為主，圖 5-25 至圖 5-27 可看出本文系統能有效抑制電壓諧波，圖 5-29 與圖 5-30 驗證兩種控制器皆能有效降低負載端之 THD 值，本文之模糊派

翠類神經其暫態響應較佳，能更快降低負載端受諧波污染之問題。

(六) Case6 電源端電力中斷

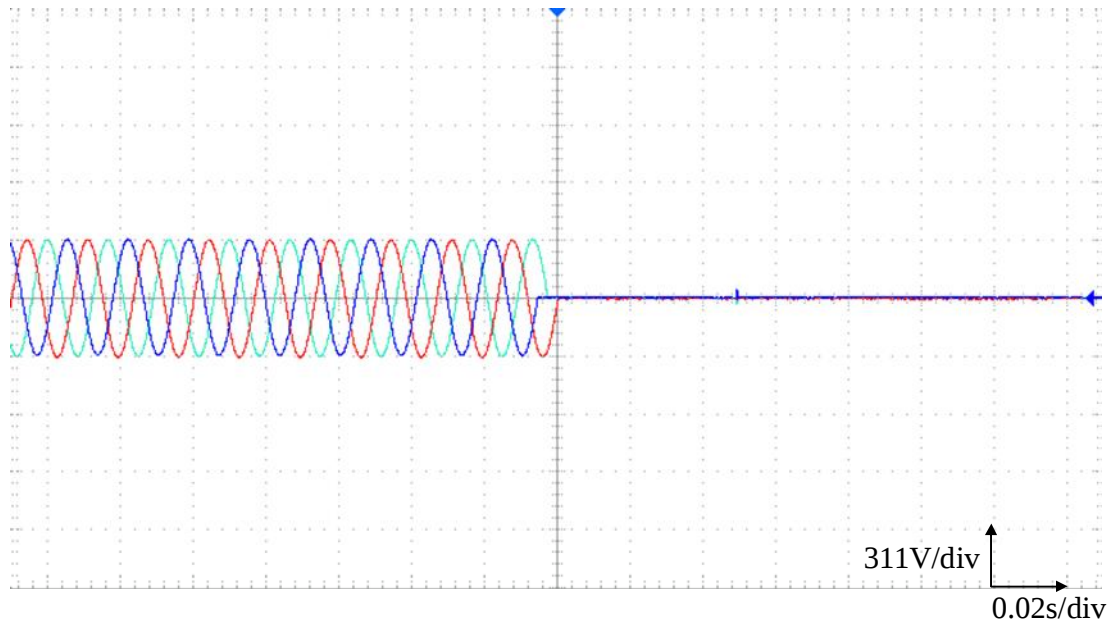


圖 5-31、電力中斷電源端電壓波形

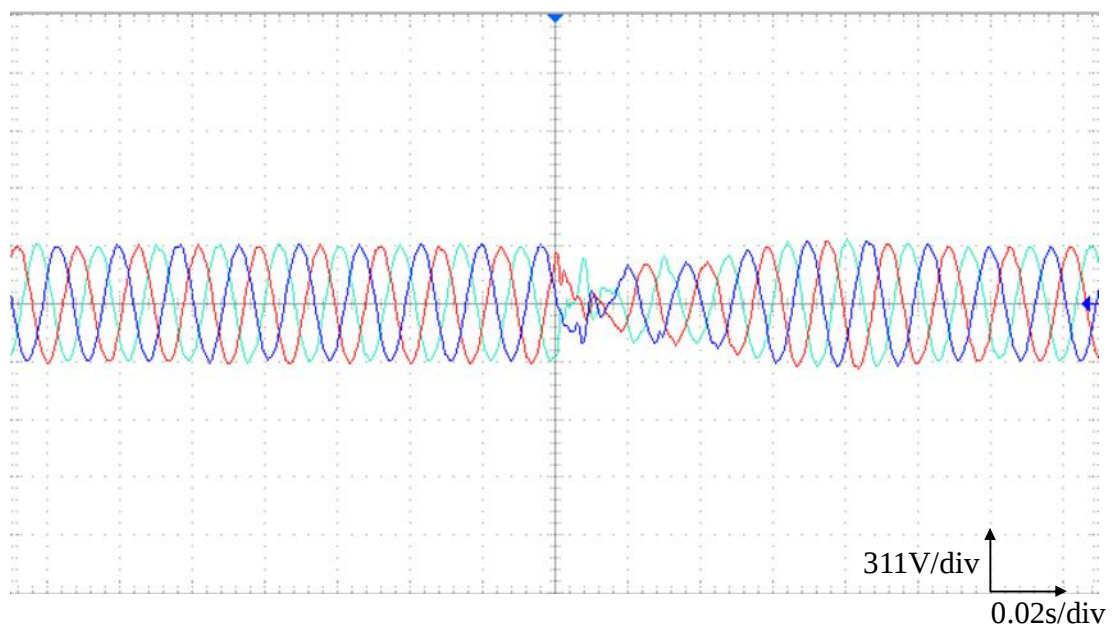


圖 5-32、電力中斷負載端電壓波形

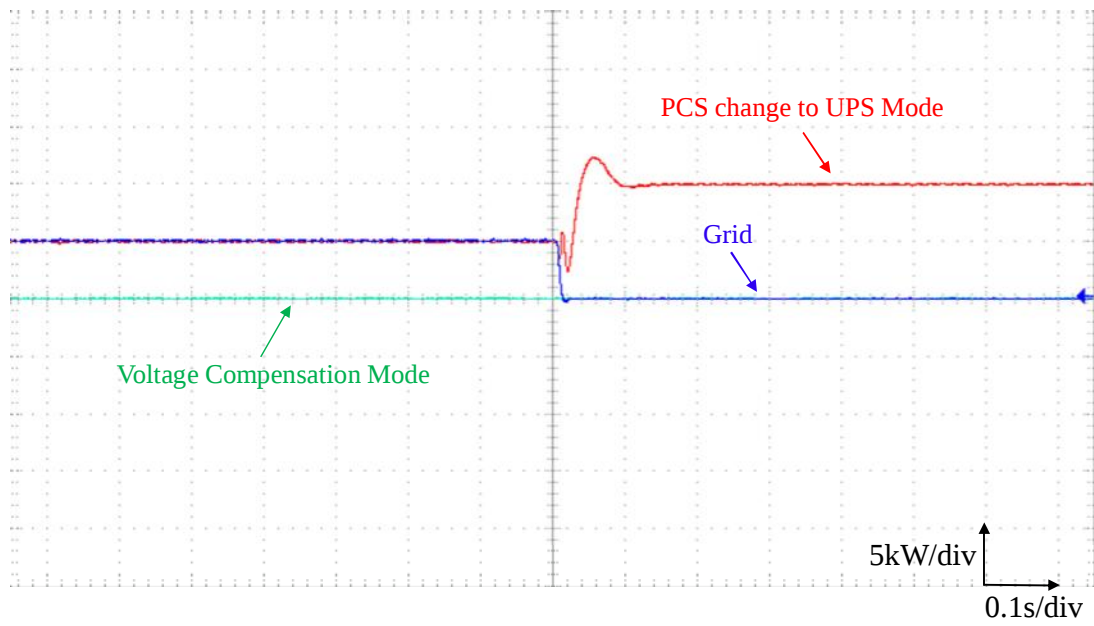


圖 5-33、電力中斷電源端與系統模式切換輸出功率波型

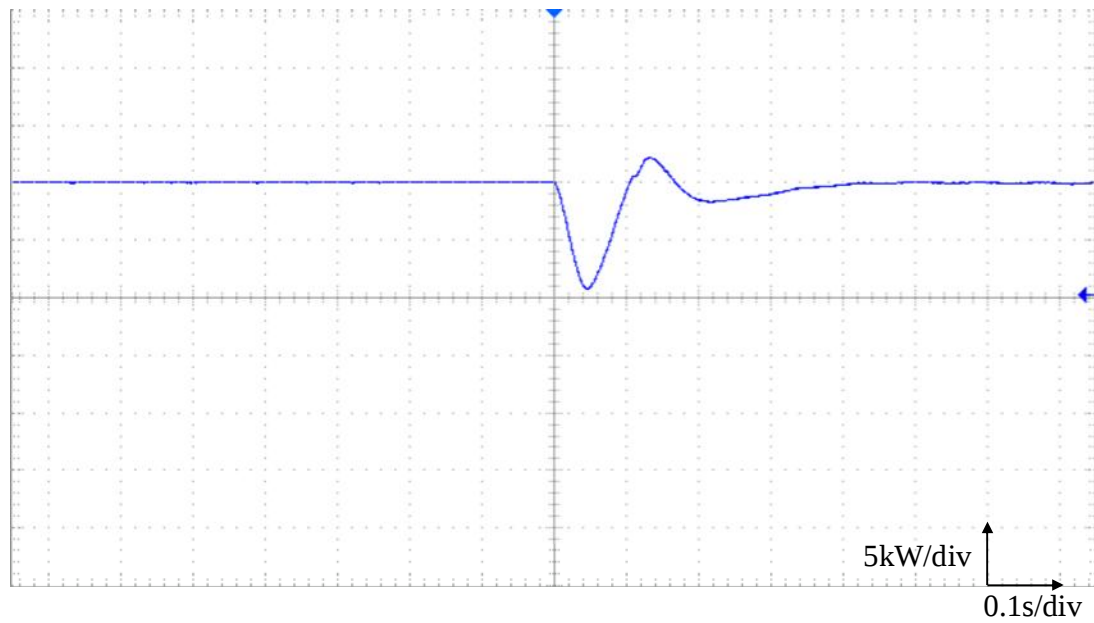


圖 5-34、電力中斷 PI 控制負載端功率波形圖

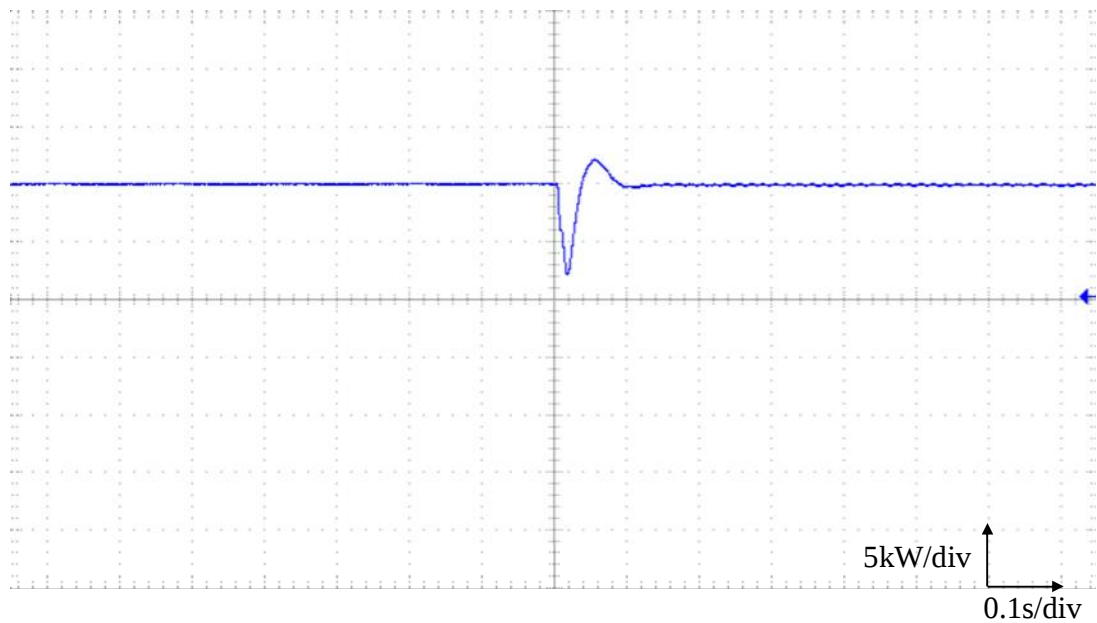


圖 5-35、電力中斷 FNPN 控制負載端功率波形圖

由圖 5-31 與圖 5-32 可以看出本文系統在面對電力中斷的情況發生時，可轉為不斷電系統模式為負載提供所需之電壓，而圖 5-33 則可看出當電源端斷電後負載所需之功率由本文系統完全提供，圖 5-34 與圖 5-35 比較本文之模糊派翠類神經網路在負載端恢復速度較快。

本章透過硬體迴圈建立與測試本文提出之系統架構，以即時模擬的方式產生各種電力事件之情境，並使用數位訊號處理器撰寫系統控制法，進一步的驗證了本文系統的可行性。由實驗結果看出本文系統能正確工作於多種模式，並有效改善不同類型之電力事件對負載造成的影響。最後，也驗證了本文提出之模糊派翠類神經網路在電壓補償響應上皆優於傳統 PI 控制。

參、主要發現與結論

本計畫已完成多模式漸進式輔助電力調節策略開發與即時模擬驗證，分別達成之目標有(1)分析國內外配電系統擾動與故障案例；(2)提出配電網發送至微電網之調度命令與通訊格式規劃；(3)探討配電系統受再生能源等不同擾動與系統故障時，提出微電網分散式電源之漸進式輔助調控策略邏輯；(4)建構微電網模型，並以即時模擬驗證所提之漸進式輔助調控策略邏輯；(5)應用在即時模擬系統 OPAL-RT 進行前述模型實測。從實驗結果可以得知本研究提出之模糊派翠類神經網路應用於三種功能控制上的響應結果皆優於傳統比例積分控制器，可使負載端之電力品質保持在更佳的水平。最後，本研究也透過即時模擬系統驗證的方式證實本計畫之多模式漸進式輔助電力調節系統架構與控制法能正確發揮其多功能的特性。以微電網發展為主的智慧電網技術正逐漸趨於成熟，而功率調節系統因可改善再生能源發電的不穩定性，現今已普遍搭配儲能系統控制運用於微電網當中。本研究提出之多模式漸進式輔助電力調節系統架構除了具有原本的功率調節功能外，額外設計了電壓補償功能與不斷電系統功能，使得負載在面臨不同的電力品質事件時也能維持穩定運作。

目前研究成果，已投稿國際期刊論文及國內研討會論文各一篇。

1. Jun-Hao Chen, Kuang-Hsiung Tan, and Yih-Der Lee, "Intelligent Controlled DSTATCOM for Power Quality Enhancement," *Energies*, 15, 4017, pp. 1-19, May 2022.
2. 陳正一、戴于竣、李奕德，基於多微電網之協調及保護控制策略，第四十三屆中華民國電力工程研討會，2022 年 12 月 1-2 日，

台灣台中市。

本計畫之研究重點著重在系統架構與其控制法搭配的可行性，以及比較智慧型控制法與傳統比例積分控制器應用的響應差異。在模擬架構方面，目前模擬環境僅一台逆變器，未來可與其他再生能源發電系統併網以形成較大的模擬環境，測試本文系統在與微電網併網的環境下其運行結果與效能是否能保持相同水準，另外本研究系統架構的開關元件選擇是否會影響實驗結果，也可再做進一步的驗證。

而在系統控制法方面，功率調節模式下之控制法可採用較複雜的功率平滑化控制，電壓補償模式下之控制法也可嘗試反饋或多環控制以測試其是否具有更佳的效果，智慧型控制法也能測試多種不同的模糊類神經之優缺點。最後，本研究採用即時模擬系統進行控制策略驗證，希望未來能夠在實際硬體上測試本研究系統架構與控制法，使功率調節系統能確實達成多功能特性，並有更多研究與發展的方向。

肆、參考文獻

- [1] N. Bazmohammadi, A. Madary, J. C. Vasquez, H. Baz Mohammadi, B. Khan, Y. Wu, and J. M. Guerrero, "Microgrid digital twins: concepts, applications, and future trends," *IEEE Access*, Vol. 10, Dec. 2021, pp. 2284-2302.
- [2] *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.
- [3] C. I Chen, C. K. Lan, Y. C. Chen, C. S. Chen, and Y. R. Chang, "Wavelet energy fuzzy neural network-based fault protection system for microgrid," *Energies*, 13, 1007, 2020, pp. 1-13.
- [4] R. Lasseter and G. Venkataramanan, "Microgrid operation and control," *Power System Engineering Research Center*, 2001, 405-408.
- [5] G. Venkataramanan and R. Lasseter, "Operation and control of a microgrid for feeding sensitive loads," *Electric Distribution Transformation Program 2004 Annual Program and Peer Review Meeting*, California United States, 2003, 806-812.

- [6] Y. A. R. I. Mohamed, "New control algorithms for the distribution generation interface in grid-connected and micro-grid systems," The University of Waterloo Dissertation for the Doctoral Degree, 2008, 1-130.
- [7] Armando Bellini, Stefano Bifaretti, and Franco Giannini, "A robust synchronization method for centralized microgrids", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 51, No. 2, Apr. 2015, pp. 1602-1609.
- [8] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, and A. V. Timbus, "Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 53, Oct. 2006, no. 5, pp. 1398-1409.
- [9] P. Rodriguez, J. Pou, J. Bergas, J. I. Candela, R. PBurgos, and D. Boroyevich, "Decoupled double synchronous reference frame PLL for power converters control," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 22, Mar. 2007, pp. 584-592.
- [10] N. W. A. Lidula and A. D. Rajapakse, "Voltage balancing and synchronization of microgrids with highly unbalanced loads," *Renew Sustain Energy Rev*, 31, 2014, pp. 907-920.
- [11] C. T. Lee, R. P. Jiang, and P. T. Cheng, "A grid synchronization

- method for droop-controlled distributed energy resource converters,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 49, Apr. 2013, pp. 954-962.
- [12] P. Rodriguez, A. Luna, I. Candela, R. Muijal, R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, “Multiresonant frequency-locked loop for grid synchronization of power converters under distorted grid conditions,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.58, Jan. 2011, pp.127-138.
- [13] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, and P. Rodríguez, “Control of power converters in AC microgrids,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 27, Nov. 2012, pp.4734-4749.
- [14] 楊豐碩、卓金和、陸臺根、于席正、許立翰、黃琮葆，「國外輔助服務之探討」，台電工程月刊第 841 期，第 17-46 頁，中華民國 107 年 9 月。
- [15] P. Patel, A. Shandilya, and D. Deb, “Optimized hybrid wind power generation with forecasting algorithms and battery life considerations,” *Proc. IEEE Power Energy Conf. at Illinois (PECI)*, Feb. 2017, pp. 1-6.
- [16] A. Saez-de-Ibarra, E. Martinez-Laserna, D. Stroe, M. Swierczynski, and P. Rodriguez, “Sizing study of second life li-ion

- batteries for enhancing renewable energy grid integration,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 6, pp. 4999-5008, 2016.
- [17] X. Li, D. Hui, and X. Lai, “Battery energy storage station (BESS)-based smoothing control of photovoltaic (PV) and wind power generation fluctuations,” *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, no. 2, pp. 464-473, 2013.
- [18] A. Chaouachi, R. M. Kamel, R. Andoulsi and K. Nagasaka, "Multiobjective intelligent energy management for a microgrid", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 4, pp. 1688-1699, Apr. 2013.
- [19] M. Carrion and J. Arroyo, "A computationally efficient mixed-integer linear formulation for the thermal unit commitment problem", *IEEE Transactions on Power System*, vol. 21, no. 3, pp. 1371-1378, Aug. 2006.
- [20] A. Hajizadeh, M. A. Golkar and A. Feliachi, "Voltage Control and Active Power Management of Hybrid Fuel-Cell/Energy-Storage Power Conversion System Under Unbalanced Voltage Sag Conditions," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 25, no. 4, pp. 1195-1208, Dec. 2010.

- [21] *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, IEEE Std. 1159-2019, June 2019.
- [22] 全國法規資料庫，電業供電電壓及頻率標準，中華民國 106 年 06 月 12 日。
- [23] *IEEE Recommended Practice for the Analysis of Fluctuating Installations on Power Systems*, IEEE Std. 1453-2015, Oct. 2015.
- [24] Moallem, P., A. Zargari, and A. Kiyoumars, "Improvement in Computation of ΔV_{10} Flicker Severity Index Using Intelligent Methods," *Journal of Power Electronics*, 2011.
- [25] 台灣電力股份有限公司電壓閃爍管制要點，中華民國 97 年 8 月 18 日。
- [26] *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, IEEE Std. 519-2014, June 2014.
- [27] 電力系統諧波管制暫行標準，中華民國 82 年 6 月 4 日。
- [28] Sunil Singh, Ajay Srivastava, "Voltage unbalance and its impact on the performance of three-phase Induction motor: a review," *IJRASET*, Vol. 7, Issue VII, 2019.
- [29] 中華民國國家標準 CNS，電力品質評估-公用電力網路供電特性，中華民國 108 年。

- [30] 台灣電力股份有限公司，資訊圖表，近十年每戶停電次數，近十年每戶停電時間，中華民國 109 年。
- [31] 全國法規資料庫，電源不足時期限制用電辦法，中華民國 95 年 12 月 29 日。
- [32] Natural Resources Canada. Accessed: March 30, 2022. [Online]. Available: <http://www.nrcan.gc.ca/>
- [33] D. Steward and J. Zuboy, “Community Energy: Analysis of hydro-gen distributed energy systems with photovoltaics for load leveling and vehicle refueling,” Nat. Renew. Energy Lab., Golden, CO, USA, Tech. Rep. NREL/TP-6A20-62781, Jan. 2014.
- [34] Japanese Smart Energy Products & Technologies, Jpn. Bus. Alliance Smart Energy Worldwide (JASE-W), Tokyo, Japan, 2018.
- [35] “Forging a new approach to using clean energy,” Southern California Edison, Rosemead, CA, USA, Tech. Rep., 2016. [Online]. Available: https://www.sce.com/sites/default/files/inline-files/SCE_PRPOverview.pdf
- [36] Y. Nakanishi, “Kitakyushu smart community & technologies,” in Proc. IEEE ISGT, Feb. 2014, pp. 5-7. [Online]. Available: http://sites.ieee.org/isgt2014/files/2014/03/Day3_Panel3C_YosukeNakanishi.pdf

- [37] Working Borough Council's Joint Venture Project, Energy Saving Trust, London, U.K., 2005.
- [38] M. Stone. (Mar. 21, 2017). Sonnen Tries Different Virtual Power Plant Models in Germany, Australia and America, Greentech Media. Accessed: March 30, 2022. [Online]. Available: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/sonnens-new-virtual-power-plant-model-differs-by-country#gs.3g1eyLk>
- [39] P. Hines, J. Apt, and S. Talukdar, "Trends in the history of large blackouts in the United States," *Proc. IEEE Power Energy Soc. Gen. Meeting-Convers. Del. Elect. Energy 21st Century*, Jul. 2008, pp. 1-8.
- [40] A Guide to a Critical Infrastructure Security and Resilience. CISA, USA. Accessed: March 30, 2022. [Online]. Available: <https://www.cisa.gov/sites/default/files/publications/Guide-Critical-Infrastructure-Security-Resilience-110819-508v2.pdf>
- [41] 楊豐碩、卓金和、陸臺根、于席正、許立翰、黃琮葆，「國外輔助服務之探討」，台電工程月刊第 841 期，第 17-46 頁，中華民國 107 年 9 月。
- [42] <https://etp.taipower.com.tw/>
- [43] A. K. Sadigh and K. M. Smedley, "Review of voltage compensation

- methods in dynamic voltage restorer (DVR)," *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-8, 2012.
- [44] W. V. Lyon, Application of the method of symmetrical components, New York: McGraw Hill, 1937.
- [45] 王文俊，認識 Fuzzy 理論與應用(第 4 版)，全華圖書股份有限公司，中華民國 2020 年 09 月。
- [46] F. -J. Lin, J. -C. Liao, C. -I. Chen, P. -R. Chen and Y. -M. Zhang, "Voltage Restoration Control for Microgrid With Recurrent Wavelet Petri Fuzzy Neural Network," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 12510-12529, 2022.