

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

含綠能之三相不平衡配電轉供策略研究

Study of Electric Power Distribution for Three-phase Unbalanced
Power System

計畫編號：109A011

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@ee.ncu.edu.tw

協同主持人：談光雄

研究期程：中華民國 109 年 2 月至 109 年 12 月

研究經費：新臺幣 85 萬元

核研所聯絡人員：劉力源

報告日期：109 年 11 月 26 日

目 錄

目 錄.....	I
中文摘要.....	1
ABSTRACT.....	2
壹、計畫緣起與目的.....	3
貳、微電網系統控制策略與不平衡補償.....	6
一、定功率控制法.....	6
二、電壓、頻率控制法.....	7
三、下降控制法.....	8
四、不平衡補償負載策略.....	9
五、三相三臂變流器儲能系統特性模擬結果.....	10
六、使用 PSIM 模擬三相六臂變流器之儲能系統與柴油發電機進行併聯控制，並開發調壓調幅、及併網瞬間功率輸出等控制策略，降低併網時對微電網配電饋線之衝擊。.....	20
七、使用 PSIM 模擬當再生能源功率發生波動下，三相六臂變流器之儲能系統(運作在 PQ 模式及 VF 模式) 與柴油發電機併聯運轉發電情形，並開發包含儲能系統 DROOP 負載功率比例分擔之自主發電強健性控制策略，提高配電饋線系統電壓/頻率穩定.....	24
八、使用 PSIM 模擬上述情境下，於線上逐漸降低柴油發電機輸出功率，到停止功率輸出時，由三相六臂變流器之儲能系統提供主要電壓源，其系統電網電壓、頻率之暫穩態響應情形.....	30
九、使用 PSIM 模擬三相六臂變流器之儲能系統與柴油發電機併聯穩定運轉下，三相負載不平衡對微電網配電饋線系統之影響，並開發三相六臂變流器之儲能系統於不平衡情境下之補償策略.....	36
參、主要發現與結論.....	42
目前研究成果.....	42
肆、參考文獻.....	43

中文摘要

本計畫主要目標為研究微電網內各分散式電源與儲能自主發電調配能力，以因應再生能源之高滲透率、各項電子設備感測元件隨時間衰退與三相不平衡負載等，所造成控制不佳與系統能源損耗情形，為克服此問題，本計畫將研究微電網內各分散式電源饋線系統間調控技術與轉供策略，並透過補償三相不平衡負載，以強化微電網系統之穩定性。此外，本計畫將依據核能所微電網系統為基礎，建立相關微電網系統，其微電網系統包含柴油發電機、儲能系統與三相負載，並依此探討分散式電源在不同運作模式之間互相轉供策略以維護微電網系統之穩定性。

關鍵字：微電網、柴油發電機、儲能系統、不平衡補償。

Abstract

The main objective of this project is to study the generation and distribution capabilities of various distributed generators. Due to the high penetration rate of the renewable energy, the decline of sensing components of various electronic equipment, and three-phase unbalanced loads, the control performance of the microgrid is very poor and cause the energy loss. To overcome this problem, the regulation technology and transfer strategy between the distributed generators and the feeder of the microgrid are researched in this project to maintain the stability of the microgrid system by compensating the three-phase unbalanced loads. Moreover, the microgrid system of the institute of Nuclear Energy Research (INER), including diesel generators, storage system and three-phase unbalanced loads, is adopted to established the simulation models. Based on this system, the regulation and transfer strategy of the distributed generators in different operating modes will be discussed to maintain the stability of the microgrid system.

Keywords : Microgrid, Diesel Generator, Storage System, Unbalance Compensation.

壹、計畫緣起與目的

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 [1, 2]。

分散式電源若採用再生能源，將可有效減緩全球溫室效應的惡化與地球上有限石化能源的枯竭。再生能源包含：太陽能、風能、水力、地熱、波浪能、生質能與潮汐能等，以再生能源為主的分散式電源具有模組化、建造時程短與接近負載端的特性等優點，儘管分散式電源擁有許多優點，但隨著分散式電源不斷擴增，越來越多的分散式電源與市電併聯運轉產生諸多問題，例如分散式電源單機併入系統的成本高、電源設備控制與相容性問題等。不僅如此，分散式電源對於市電而言較不易控制，因此電機電子工程師學會

(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)在 2000 年針對市電併聯太陽能發電系統的電力品質及其相關安全保護進行規範更新，並制定 IEEE 929-2000 標準規範[3]，之後再針對其他併網系統之分散式電源制定了 IEEE 1547 標準規範[4]。IEEE 1547 對於分散式電源併網制定了相關規範，減少對市電的衝擊，但同時也限制了分散式電源的效能[2]。

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[5, 6]：(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)[7, 8]。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，本計畫主要目標為研究微電網內各分散式電源與儲能自主發電調配能力，以因應再生能源之高滲透率、各項電子設備感測元件隨時間衰退與三相不平衡負載等，所造成控制不佳與系統能源損耗情形，為克服此問題，本計畫亦研究微電網內各分散式電源饋線系統間調控技術與轉供策略，並透過補償三相不平衡負載，以強化微電網系統之穩定性。此外，本計畫依據核能所微電網系統為基礎，建立相關微電網系統，其微電網系統包含柴油發電機、儲能系統與三相負載，並依此探討分散式電源在不同運作模式之間互相轉供策略以維護微電網系統之穩定性。

貳、微電網系統控制策略與不平衡補償

在微電網系統中最重要之議題為功率分配亦即電能管理，在併網模式運作時，市電與微電網內各分散式電源將一起負責負載所需功率並達到供需平衡，而當在孤島運轉模式時，由於微電網已與市電脫離，微電網內分散式電源將適時改變輸出功率或者利用負載卸除，以符合負載供需平衡；另外，在併網模式運作時，微電網系統的電壓與頻率皆完全由市電所箝制，而當市電發生異常脫離進入孤島運轉模式時，由於供需的不平衡，將導致微電網系統的電壓與頻率造成波動，嚴重的話將導致微電網系統無法運作而崩潰。因此，目前在微電網系統分散式電源控制部分，已經發展出各種控制法則，其中最為常見的控制法則區分如下：(1)定功率控制法(P/Q Control) (2)電壓、頻率控制法(V/f Control)(3)下降控制法(Droop Control)。

一、定功率控制法

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

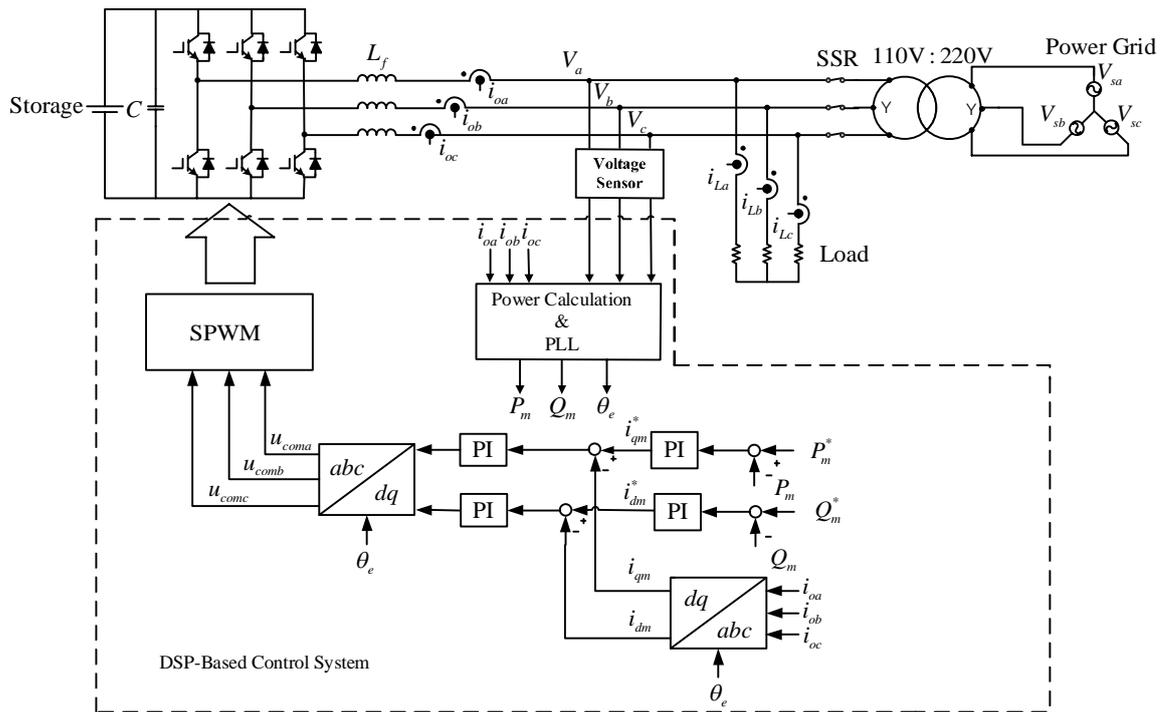


圖 2.1 實、虛功率控制架構圖

二、電壓、頻率控制法

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 2.2 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，經過 PI 控制器產生命令電流 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 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電壓與頻率的目的。

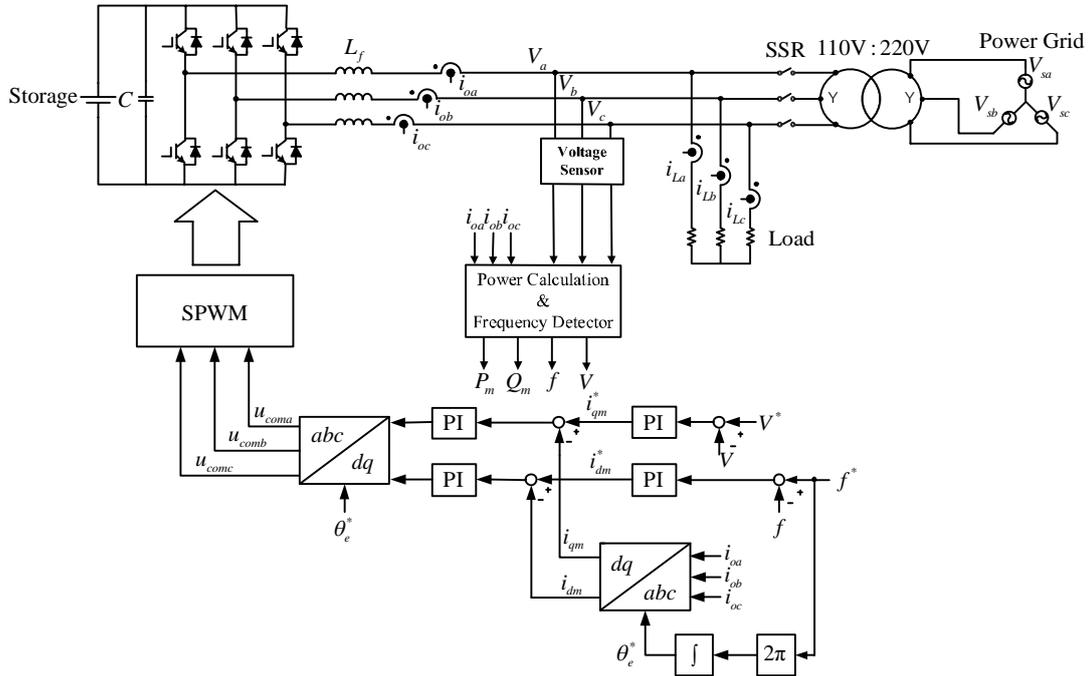


圖 2.2 電壓、頻率控制架構圖

三、下降控制法

下降控制主要是通過模擬傳統電力系統中同步發電機的下降特性曲線對轉換器進行控制的一種方法，其下降特性可表示如下：

$$f_{\min} - f_0 = -k_p(P_{\max} - P_0) \quad (1)$$

$$V_{\min} - V_0 = -k_Q(Q_{\max} - Q_0) \quad (2)$$

其曲線如圖 2.3 所示，當變流器輸出實功率為 P_0 和虛功率為 Q_0 時，變流器輸出頻率為 f_0 、幅值為 V_0 ，即運行在曲線圖中的 A 點；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 。

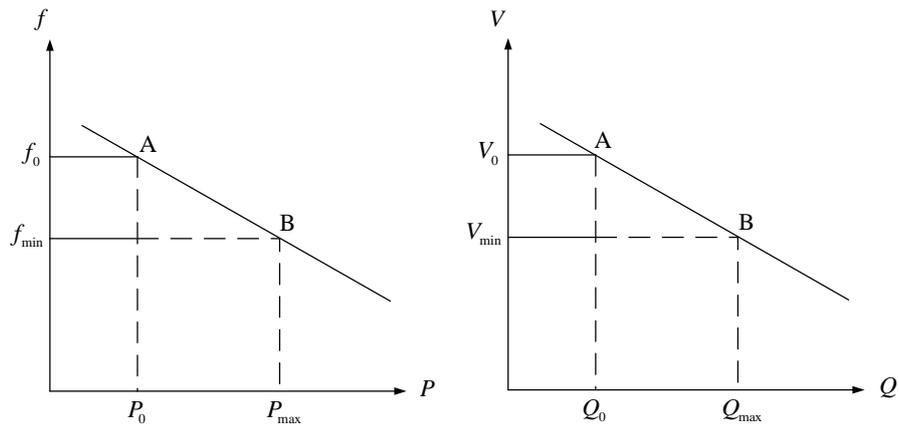


圖 2.3 下降特性曲線圖

四、不平衡補償負載策略

本計畫運用瞬時功率理論發展出不平衡負載補償控制策略，如圖 2.4 所示，首先，將三相不平衡負載之電流訊號經由瞬時功率計算得到所需補償功率(P_L 、 Q_L)；接著，同時將變流器直流鏈電壓經由直流鏈電壓之控制方法得到電流控制力(\bar{P}_{loss})；為了使責任分界點無虛功率的存在，所以令瞬時虛功命令為零($Q_s^* = 0$)，上述結合瞬時實功率 P_L 與瞬時虛功率 Q_L 。利用瞬時功率反轉算出 α 軸與 β 軸的電流命令($i_{L\alpha}$ 、 $i_{L\beta}$)再經由座標轉換得到三相電流命令(i_{La} 、 i_{Lb} 、 i_{Lc})，最後將目標參考電流透過電流控制技術產生脈波寬度調變訊號，訊號送入功率開關產生補償電流，以改善電力品質。

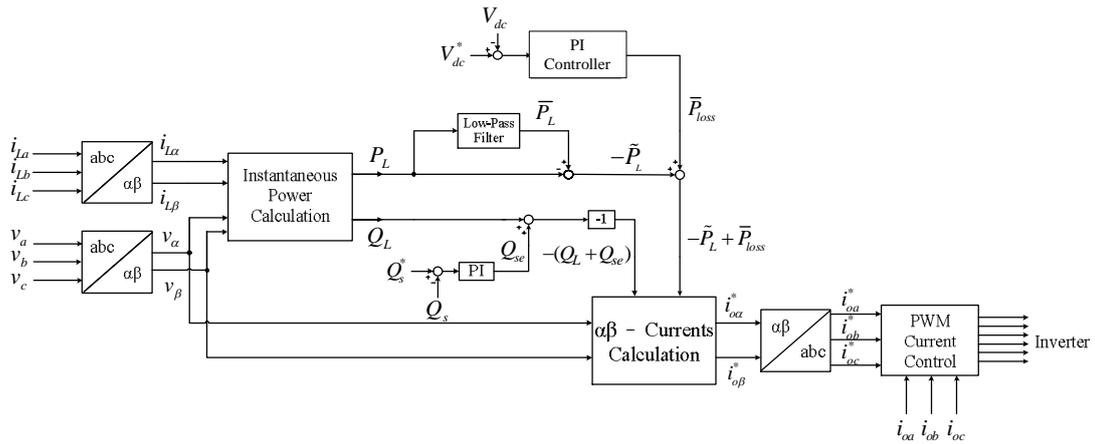


圖 2.4 不平衡負載補償控制架構圖

五、三相三臂變流器儲能系統特性模擬結果

為了驗證微電網系統與控制法則運作特性，以下模擬三種情況：

1. 併網模式：

儲能系統實功率命令為 0.5 kW-1.5 kW-1 kW，虛功率命令為 500 VAR，太陽能光電系統則是維持定功率輸出 1.5 kW，虛功率為 0 VAR，負載為 1 kW，控制方式為定功率控制法。其系統 PSIM 架構圖如圖 2.5 所示，而功率輸出結果則如圖 2.6 所示。由結果可知，系統變流器可根據功率控制命令，穩定輸出實虛功率至系統。

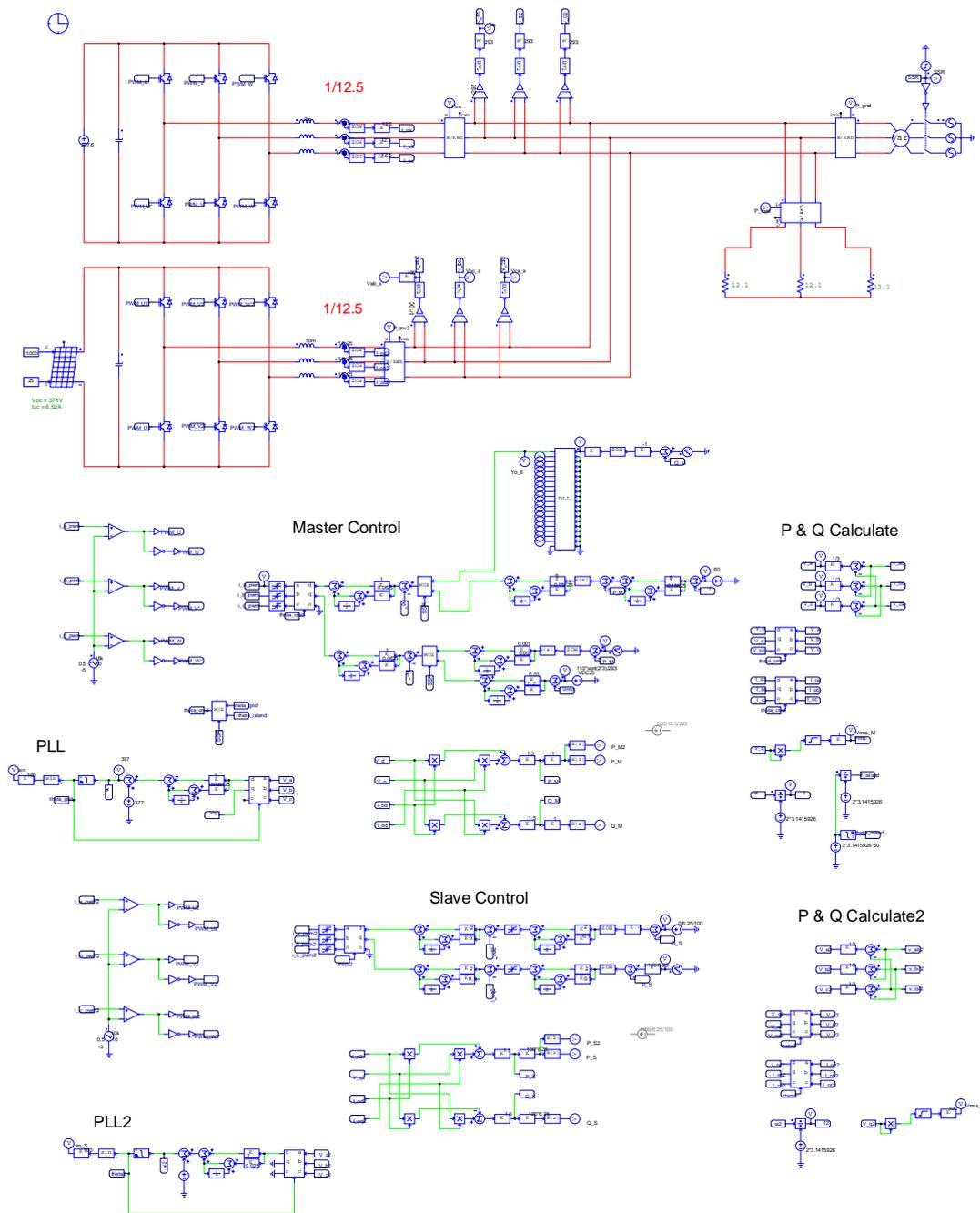
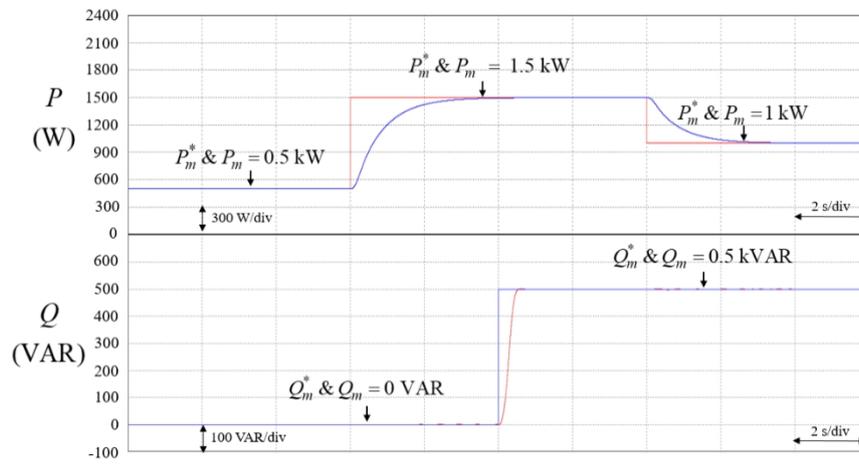
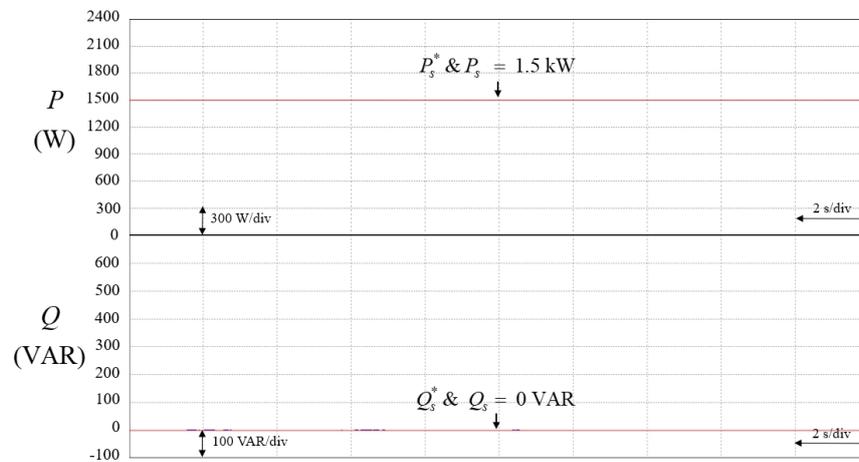


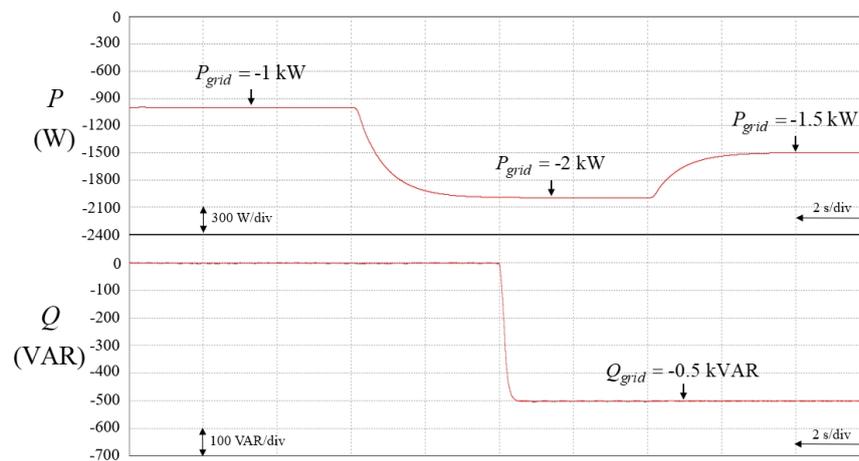
圖 2.5 併網模式系統架構



(a)



(b)



(c)

圖 2.6 (a)儲能系統實虛功率響應模擬結果、(b)太陽能光電系統實、虛功率響應模擬結果、(c)市電之實功率與虛功率響應模擬結果

2. 孤島模式(主從架構)：

本情境模擬兩組變流器之儲能系統於孤島模式下之併聯運轉發電情形，其中一台運作在定功率控制模式(Slave 端)及定電壓頻率控制模式(Master 端)。起始時三相負載功率 9.7 kW (Slave 端命令為 4 kW)，於 0.3s 時加載至 12.5 kW，於 0.4s 時降載回 9.7 kW，於 0.5s 時將 Slave 端命令更改為 3 kW。其系統 PSIM 架構圖如圖 2.7 所示，而功率輸出結果則如圖 2.8 所示。由結果可知，系統變流器可根據功率控制命令，穩定輸出實虛功率至系統，且輸出電壓與頻率皆穩定於標稱值。

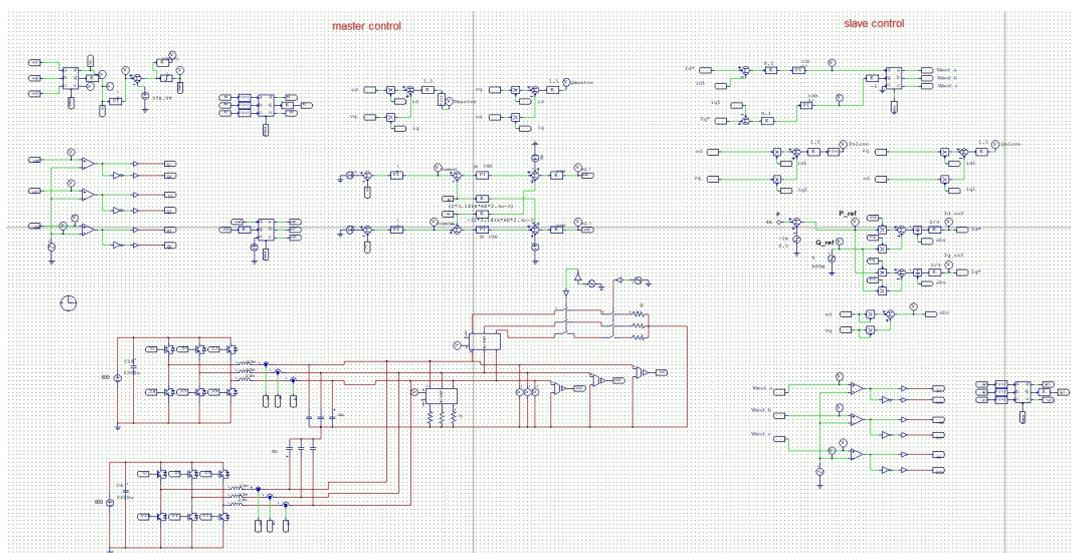


圖 2.7 孤島模式系統架構(主從架構)

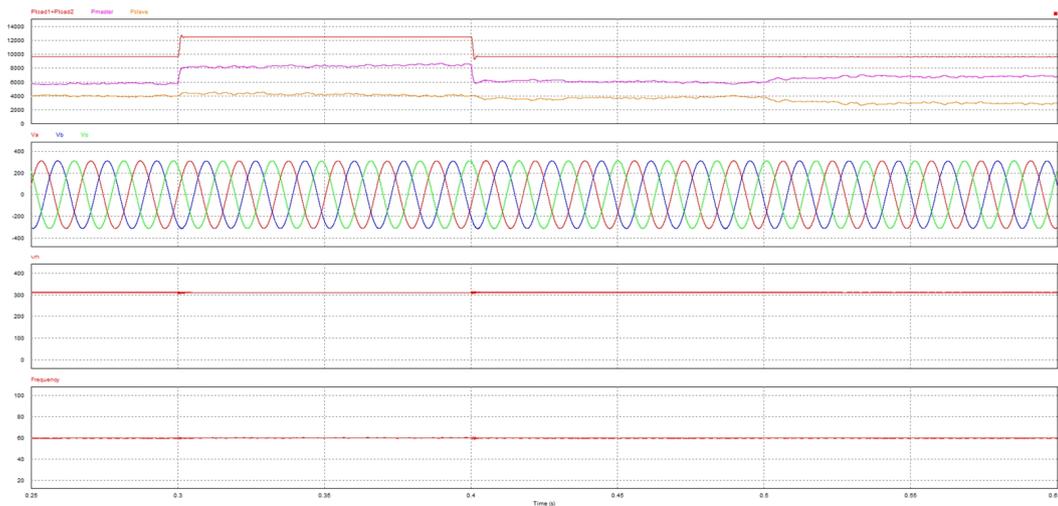


圖 2.8 (a)三相負載功率(紅)、Master 端輸出功率(粉)與 Slave 端輸出功率(橘)、(b)系統三相電壓、(c)變流器 V_d 值、(d)系統頻率

3. 孤島模式(下降控制架構)：

本情境模擬兩組變流器之儲能系統於孤島模式下之併聯運轉發電情形，於線上逐漸降低一組變流器之儲能系統輸出功率，到停止功率輸出時，由另一組變流器之儲能系統提供主要電壓源，分析系統電網電壓、頻率之暫穩態響應情形。起始時三相負載功率 1.74 kW，兩組變流器各輸出 0.87 kW，於 0.08s 時將第二組變流器關掉。其系統 PSIM 架構圖如圖 2.9 所示，而功率輸出結果則如圖 2.10 所示。由結果可知，系統變流器可根據功率控制命令，穩定輸出實虛功率至系統，且輸出電壓與頻率皆穩定於標稱值。

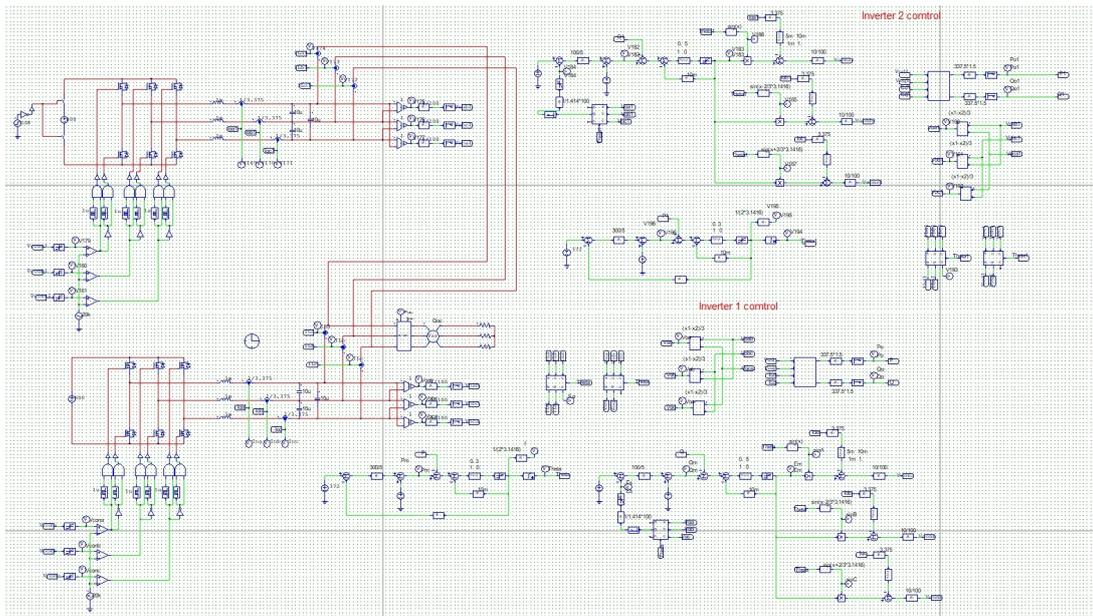


圖 2.9 孤島模式系統架構(下降控制架構)

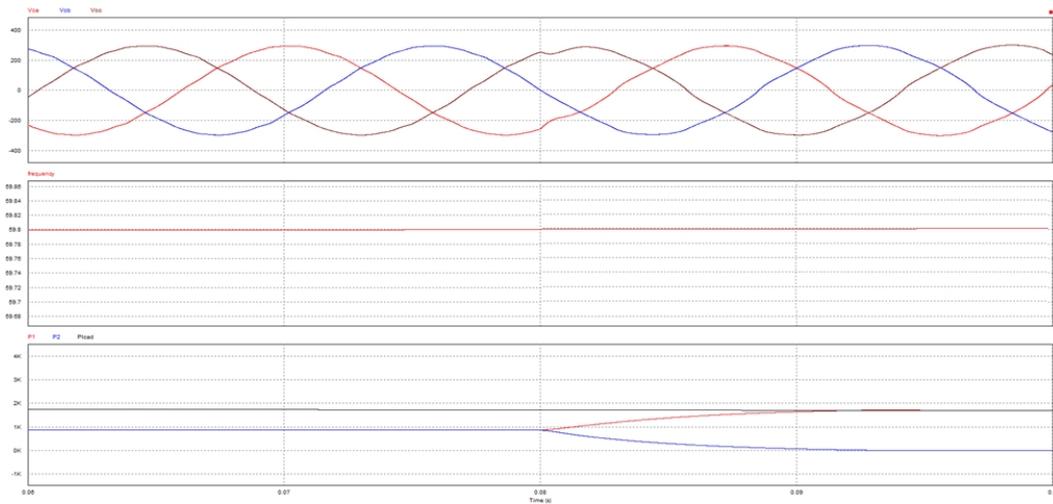


圖 2.10 (a)系統三相電壓、(b)系統頻率、(c)三相負載功率(黑)、第一組變流器輸出功率(紅)與第二組變流器輸出功率(藍)

此外，為了驗證兩台三相三臂變流器儲能系統之併聯運轉運作特性，以下模擬三種情況：

1. 當再生能源功率發生波動下，兩台三相三臂變流器之儲能系統(其中一台運作在 PQ 模式及 VF 模式)併聯運轉發電情形：

本情境模擬兩組變流器之儲能系統於孤島模式下之併聯運轉發電情形，其中一台運作在定功率控制模式(Slave 端)及定電壓頻率控制模式(Master 端)。起始時三相負載功率 1000 kW (Slave 端命令為 400 kW)，於 0.3s 時加載至 1150 kW，於 0.4s 時降載回 1000 kW，於 0.5s 時將 Slave 端命令更改為 200 kW。其系統 PSIM 架構圖如圖 2.11 所示，而功率輸出結果則如圖 2.12 所示。由結果可知，基於 Droop 控制之系統變流器可根據功率控制命令，穩定輸出功率至系統，且輸出電壓與頻率皆穩定於標稱值。

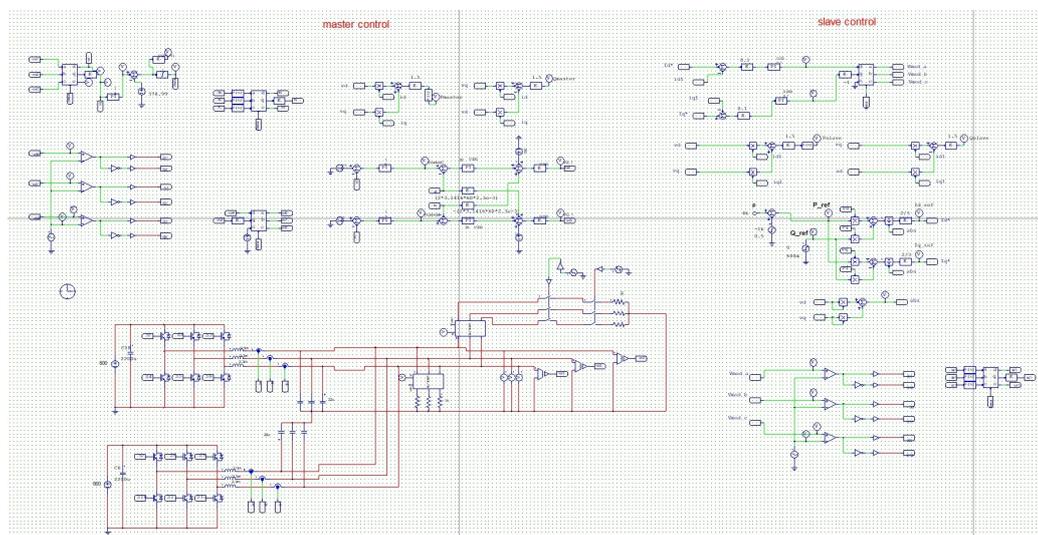


圖 2.11 孤島模式系統架構(主從架構)

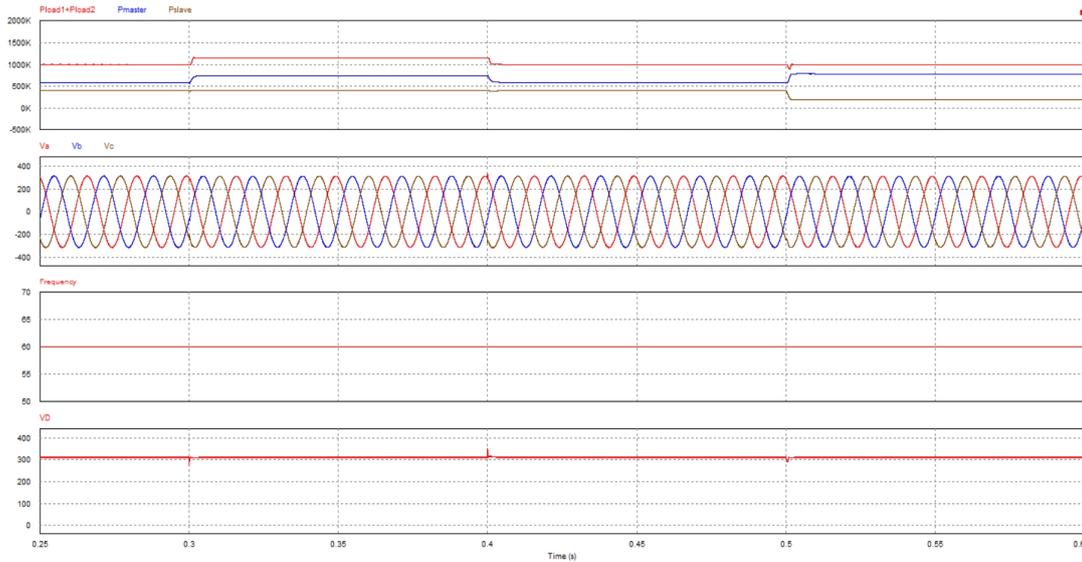


圖 2.12 (a)三相負載功率(紅)、Master 端輸出功率(藍)與 Slave 端輸出功率(棕)、(b)系統三相電壓、(c)系統頻率、(d)變流器 V_d 值

- 於線上逐漸降低一台三相三臂變流器之儲能系統輸出功率，到停止功率輸出時，由另一台三相三臂變流器之儲能系統提供主要電壓源，其系統電網電壓、頻率之暫穩態響應情形：

本情境模擬兩組變流器之儲能系統於孤島模式下之併聯運轉發電情形，於線上逐漸降低一組變流器之儲能系統輸出功率，到停止功率輸出時，由另一組變流器之儲能系統提供主要電壓源，分析系統電網電壓、頻率之暫穩態響應情形。起始時三相負載功率 1.74 kW，兩組變流器各輸出 0.87 kW，於 0.08s 時將第二組變流器關掉。其系統 PSIM 架構圖如圖 2.13 所示，而功率輸出結果則如圖 2.14 所示。由結果可知，基於 Droop 控制之系統變流器可根據功率控制命令，穩定輸出功率至系統，且輸出電壓與頻率皆穩定於標稱值。

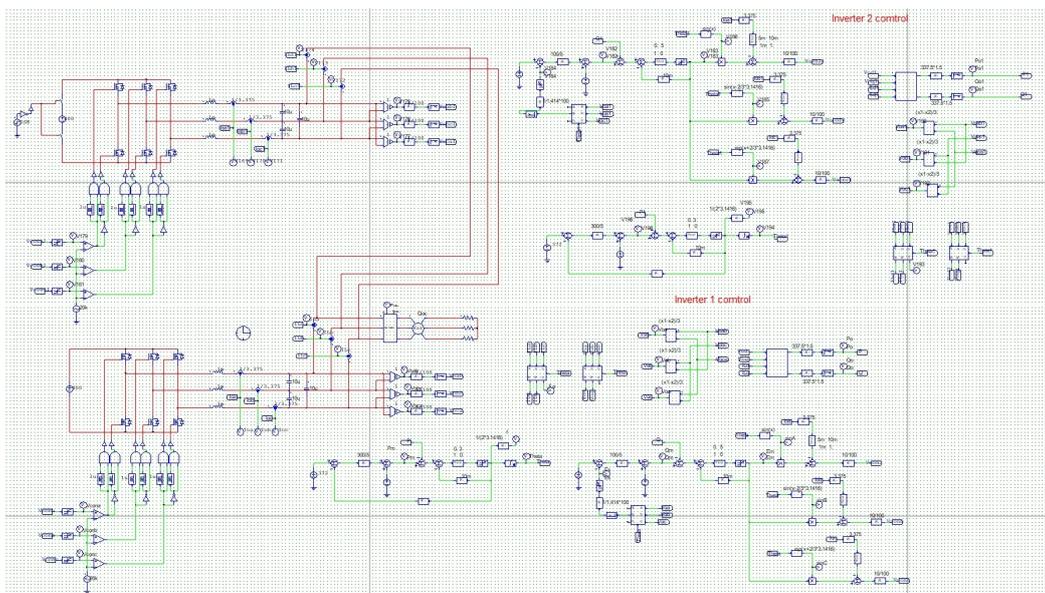


圖 2.13 孤島模式系統架構(下降控制架構)

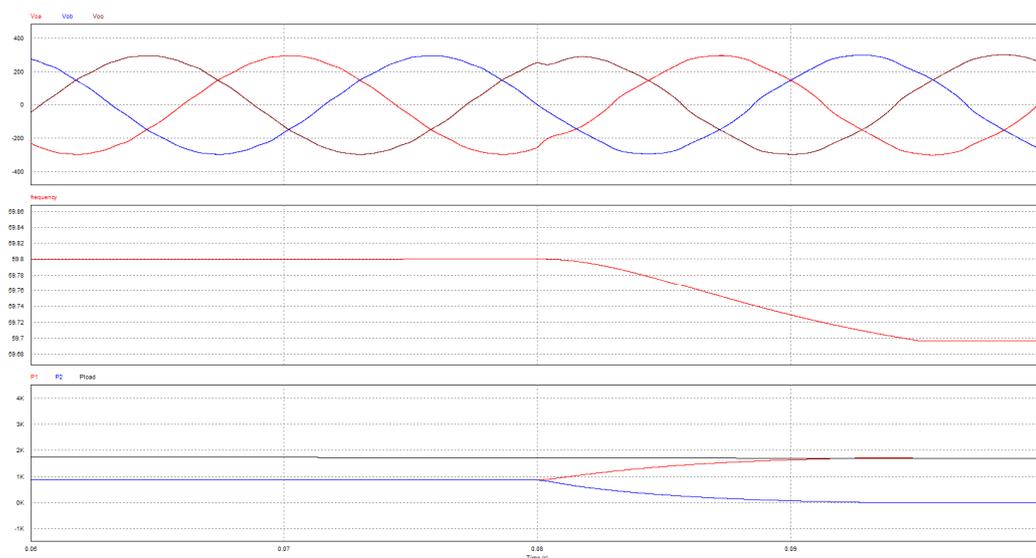


圖 2.14 (a)系統三相電壓、(b)系統頻率、(c)三相負載功率(黑)、第一組變流器輸出功率(紅)與第二組變流器輸出功率(藍)

3. 模擬微電網配電饋線系統於三相不平衡負載跳脫下，經配電轉供重新負載加重後，對系統電網電壓、頻率之影響：

本情境模擬兩組變流器之儲能系統於孤島與併網模式下之併聯運轉發電情形，於線上切換不平衡負載，分析系統電網電壓、頻率暫穩態響應情形。起始三相負載功率 1000 kW，孤島模式於 0.3s 時

將 200 kW 不平衡負載加載至 A 相(Slave 端命令為 400 kW)，並於 0.4s 時將不平衡負載卸載，如圖 2.15；併網模式於 0.3s 時將 200 kW 不平衡負載加載至 A 相(Master 端命令為 500kW，Slave 端命令為 400 kW)，並於 0.4s 時將不平衡負載卸載，如圖 2.16。

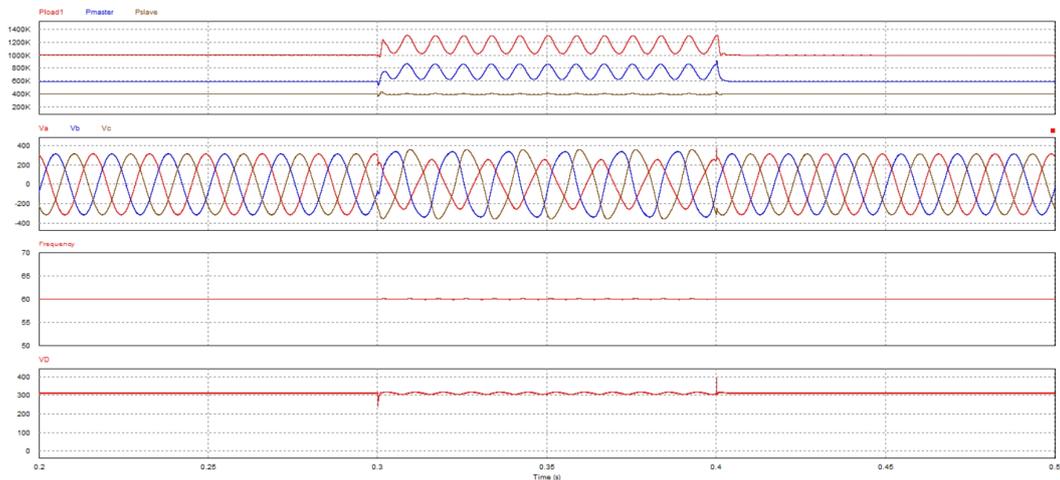


圖 2.15 孤島模式下(a)三相負載功率(紅)、Master 端輸出功率(藍)與 Slave 端輸出功率(棕)、(b)系統三相電壓、(c)系統頻率、(d)變流器

V_d 值

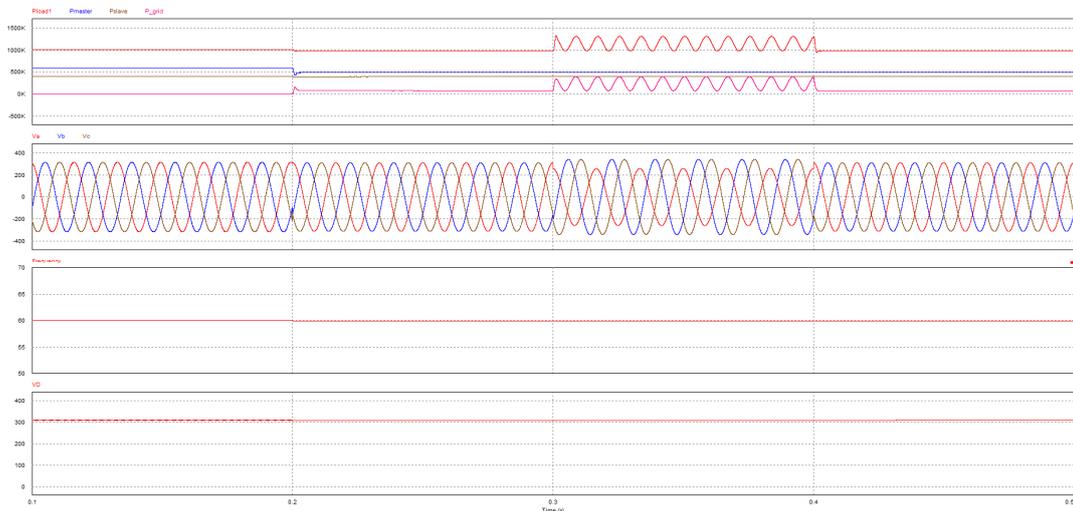


圖 2.16 併網模式下(a)三相負載功率(紅)、Master 端輸出功率(藍)與 Slave 端輸出功率(棕)、(b)系統三相電壓、(c)系統頻率、(d)變流器

V_d 值

六、使用 PSIM 模擬三相六臂變流器之儲能系統與柴油發電機進行併聯控制，並開發調壓調幅、及併網瞬間功率輸出等控制策略，降低併網時對微電網配電饋線之衝擊。

圖 2.17 為本計畫依據核能所微電網系統所建立之 PSIM 模組，其分為三個部分，第一部份為柴油發電機(Diesel Generator)，其輸出為三相定電壓 220 Vrms 與定頻率 60 Hz；第二部份為儲能系統(Battery)，由三相六臂 DC/AC 轉換器組成，其控制策略以 Bipolar 雙極性切換對三相六臂 DC/AC 轉換器控制開關；第三部份為三項純電阻性負載。本情境將區分為以下兩種模擬 Case。

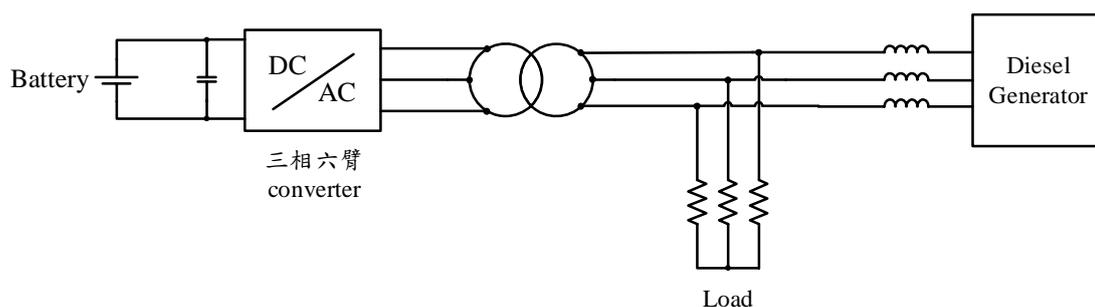


圖 2.17 微電網 PSIM 架構圖

1. CASE 1， $t = 0$ s 儲能系統併網， $t = 0.5$ s 時負載 2 kW 變 3 kW

圖 2.18 為三相六臂變流器之儲能系統控制架構圖，在 $t = 0.5$ s 時負載之實功率從 2 kW 變成 3 kW，負載之電壓、電流、功率如圖 2.19 所示，三相六臂變流器之儲能系統作實、虛功控制，實功控 1 kW，在 $t = 0$ s 時三相六臂變流器之儲能系統即與柴油發電機併聯，三相六臂變流器之儲能系統之電壓、電流、功率如圖 2.20 所示，在 $t = 0.5$ s 時柴油發電機之實功從 1 kW 變成 2 kW，柴油發電機之電壓、電流、功率如圖 2.21 所示。由圖 2.19-2.21 可知，當兩台分散式

電源於一開始併聯，無論負載變動皆能符合供需平衡，主因係柴油發電機雖然是定電壓與定頻率輸出，然其仍會依據供需而輸出功率給負載。

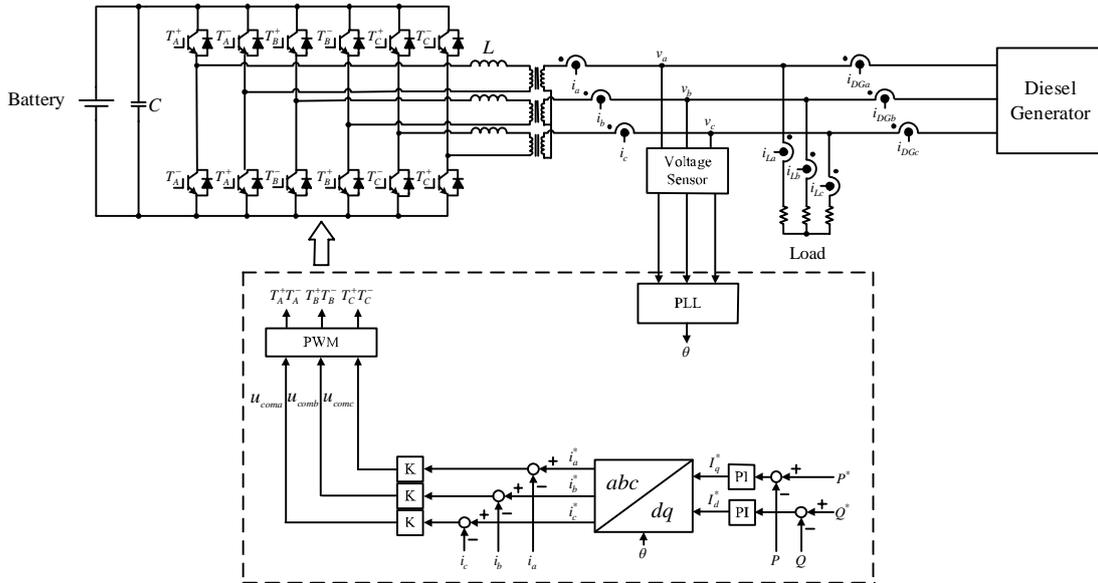


圖 2.18 三相六臂變流器之儲能系統控制架構圖

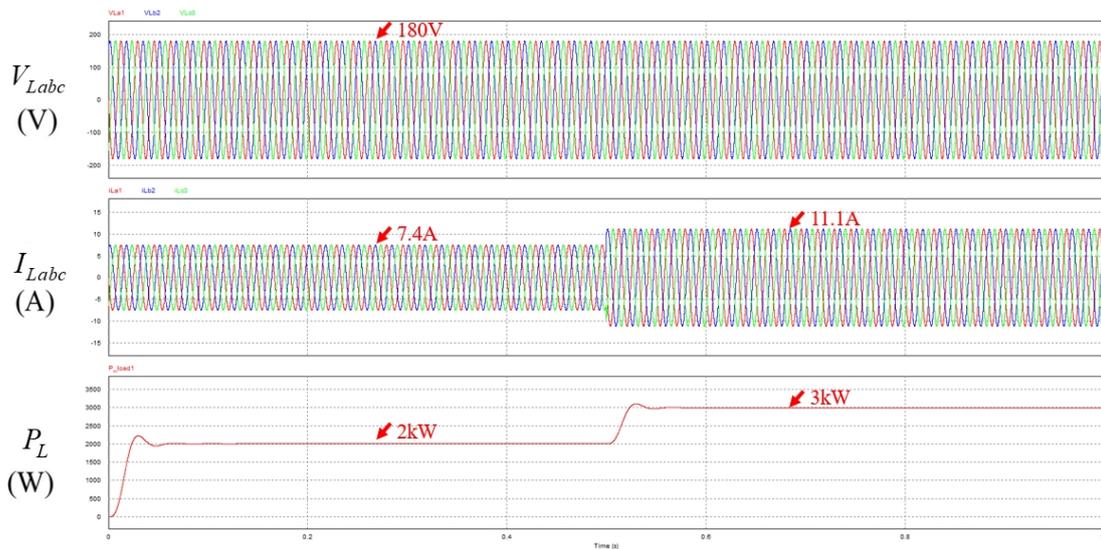


圖 2.19 負載之電壓、電流、功率

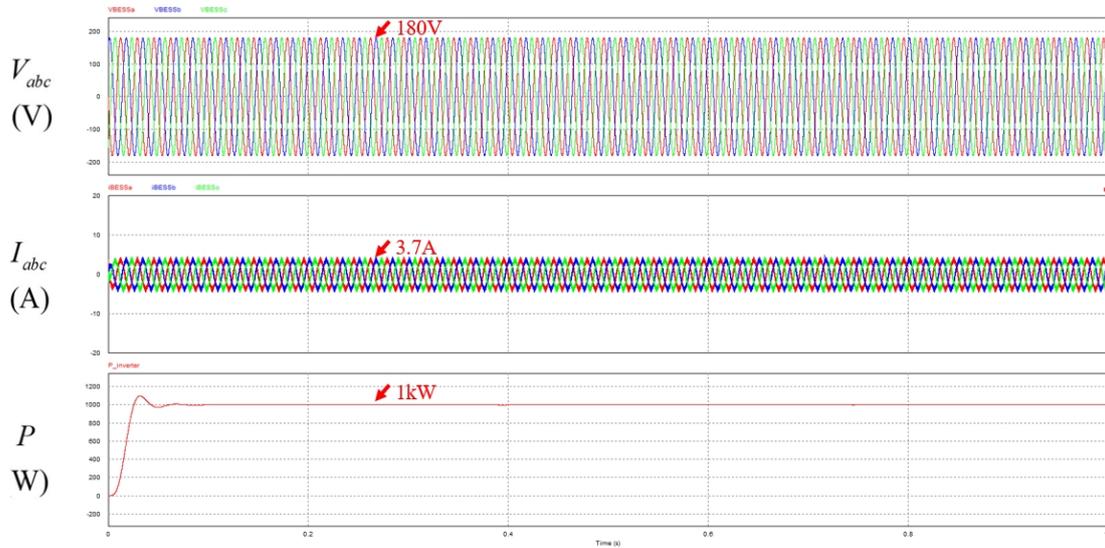


圖 2.20 三相六臂變流器之儲能系統之電壓、電流、功率

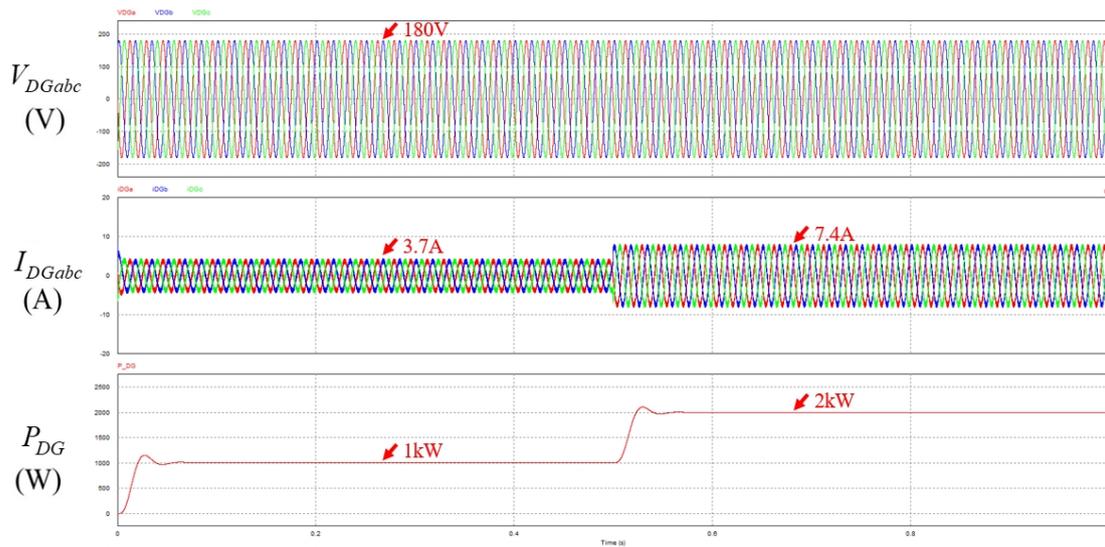


圖 2.21 柴油發電機之電壓、電流、功率

2. CASE 2, $t = 0.2$ s 儲能系統併網, $t = 0.5$ s 時負載 2 kW 變 3 kW

三相六臂變流器之儲能系統控制架構仍為實虛功控制, 如圖 2.18 所示, 在 $t = 0.5$ s 時負載之實功率從 2 kW 變成 3 kW, 負載之電壓、電流、功率如圖 2.22 所示, 三相六臂變流器之儲能系統作實虛功控制, 實功控 1 kW, 且儲能系統在 $t = 0.2$ s 時方與柴油發電機

併聯，三相六臂變流器之儲能系統之電壓、電流、功率如圖 2.23 所示，在 $t = 0.5$ s 時柴油發電機之實功從 1 kW 變成 2 kW，柴油發電機之電壓、電流、功率如圖 2.24 所示。由圖 2.23 可知，當儲能系統於 0.2 s 開始與柴油發電機併聯，其電壓電流之暫態響應不會受到太大影響，此外，由圖 2.22-2.24 可知無論負載變動亦皆能符合供需平衡。

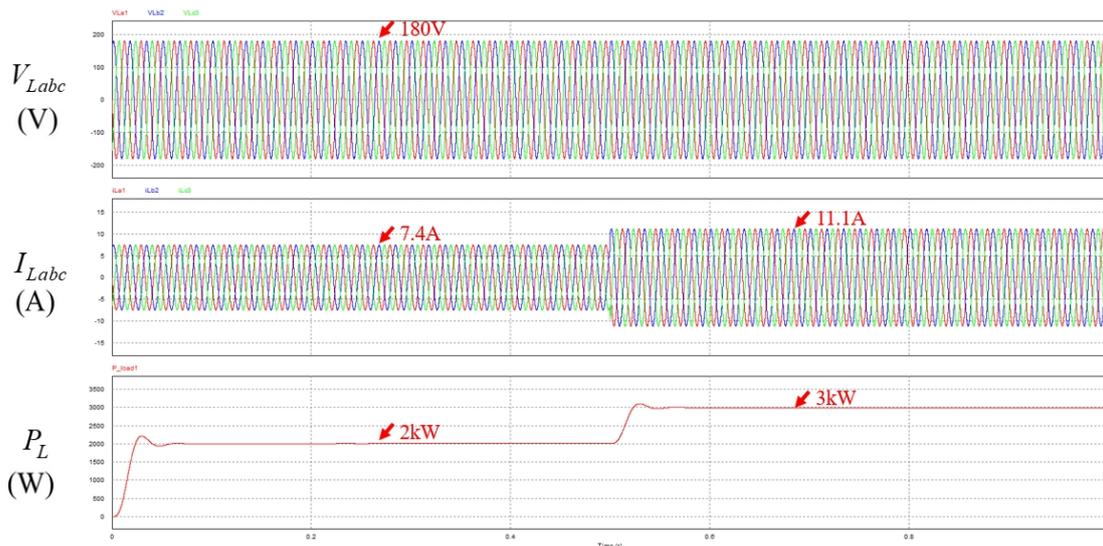


圖 2.22 負載之電壓、電流、功率

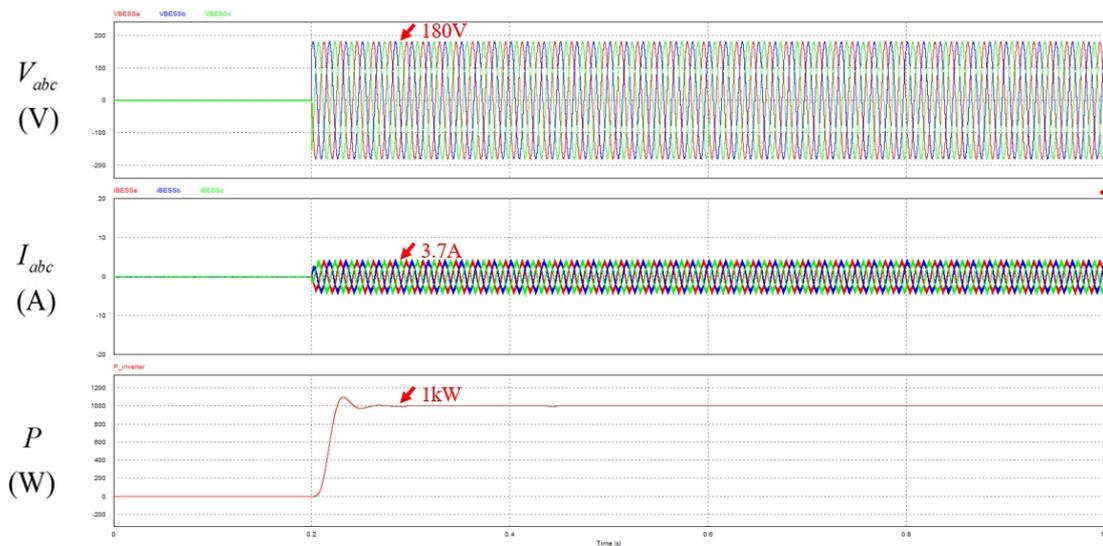


圖 2.23 三相六臂變流器之儲能系統之電壓、電流、功率

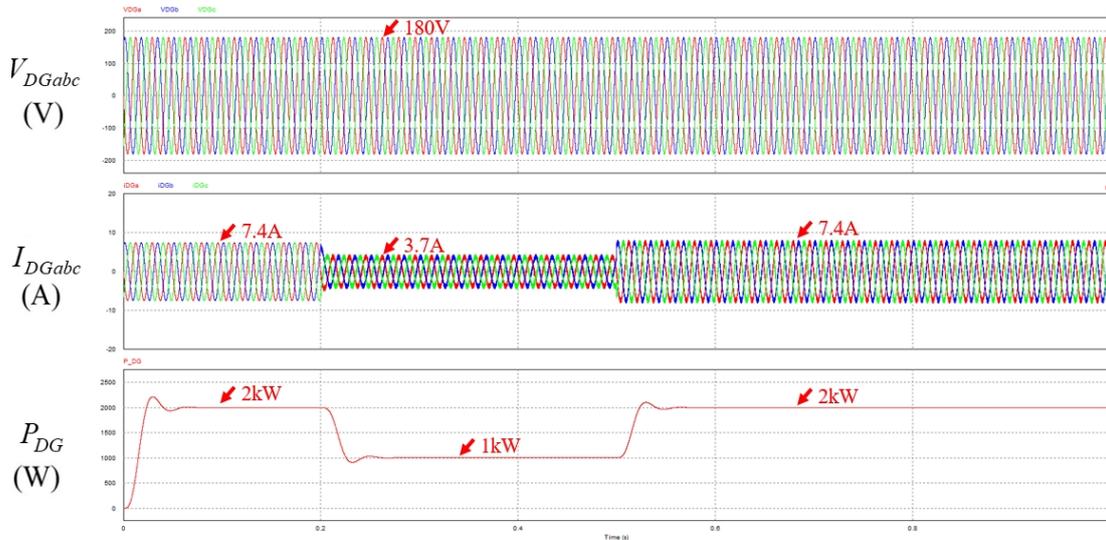


圖 2.24 柴油發電機之電壓、電流、功率

七、使用 PSIM 模擬當再生能源功率發生波動下，三相六臂變流器之儲能系統(運作在 PQ 模式及 VF 模式) 與柴油發電機併聯運轉發電情形，並開發包含儲能系統 Droop 負載功率比例分擔之自主發電強健性控制策略，提高配電饋線系統電壓/頻率穩定

圖 2.25 為該情境微電網系統所建立之架構圖，微電網架構分為三個部分，第一部分為儲能系統以三相六臂變流器所組成，第二部分為柴油發電機及 AC/DC、DC/AC inverter 所組成，第三部分為負載。本情境將區分為以下兩種模擬 Case。

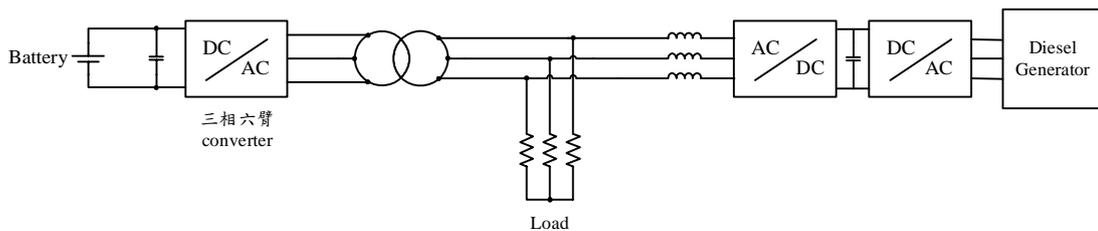


圖 2.25 微電網 PSIM 架構圖

1. CASE 1， $t = 0$ s 儲能系統併網， $t = 0.5$ s 時負載 2 kW 變 4 kW

圖 2.26 為三相六臂變流器之儲能系統 Droop 控制架構圖，Droop 的斜率為 $500 \text{ W}/(\text{rad}/\text{sec})$ ，此外，因柴油發電機輸出特性為定電壓與定頻率，故本計畫透過 AC/DC、DC/AC inverter 結合柴油發電機以作 Droop 控制，Droop 的斜率為 $500 \text{ W}/(\text{rad}/\text{sec})$ ，在 $t = 0.5$ s 時負載之實功率從 2 kW 變成 4 kW，系統頻率將從 375 rad/sec 變成 373 rad/sec，系統頻率及負載之電壓、電流、功率如圖 2.27 所示，三相六臂變流器之儲能系統作 Droop 控制，其在 $t = 0$ s 時三相六臂變流器之儲能系統即與柴油發電機併聯，在 $t = 0.5$ s 時三相六臂變流器之儲能系統之實功率將依據 Droop 特性從 1 kW 變成 2 kW，系統頻率及三相六臂變流器之儲能系統之電壓、電流、功率如圖 2.28 所示，柴油發電機透過 AC/DC、DC/AC inverter 作 Droop 控制，在 $t = 0.5$ s 時柴油發電機之實功率依據 Droop 特性從 1 kW 變成 2 kW，柴油發電機之頻率及直流鏈電壓如圖 2.29 所示，系統頻率及柴油發電機結合 AC/DC、DC/AC inverter 之電壓、電流、功率如圖 2.30 所示。由圖 2.27-2.30 可知分散式電源若以 Droop 控制時將會依據其特性與負載而變動以符合供需平衡。

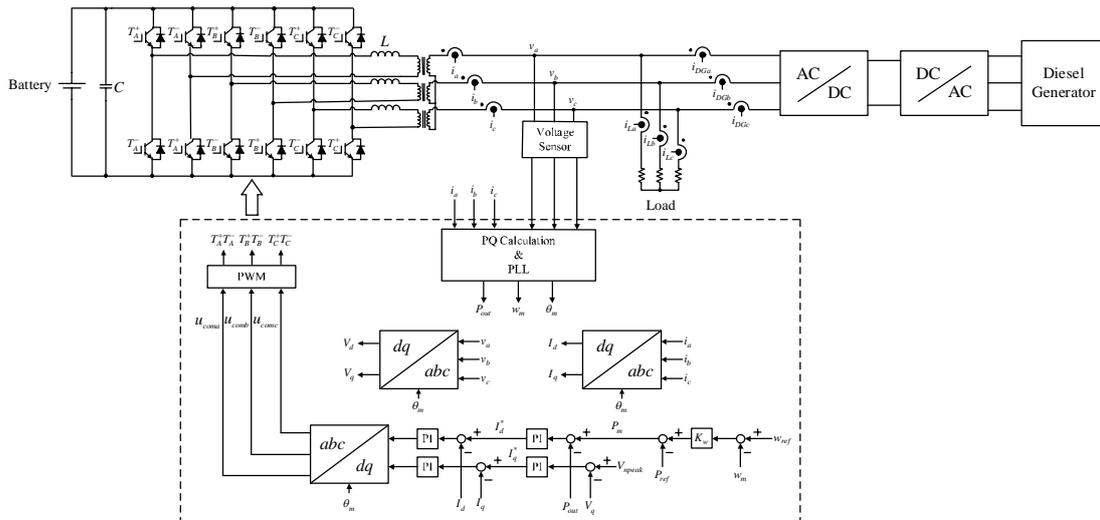


圖 2.26 三相六臂變流器之儲能系統控制架構圖

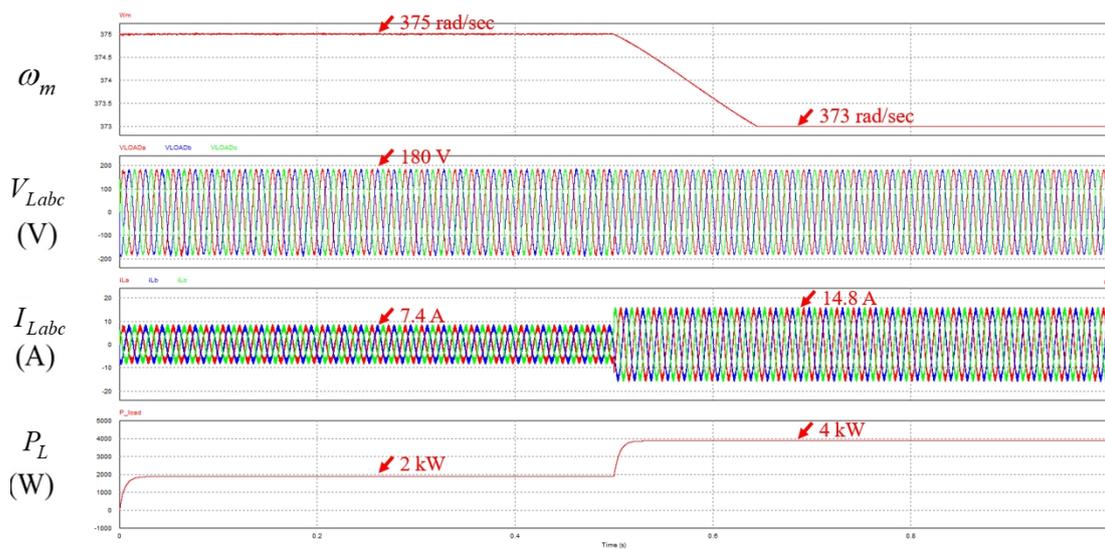


圖 2.27 系統頻率及負載之電壓、電流、功率

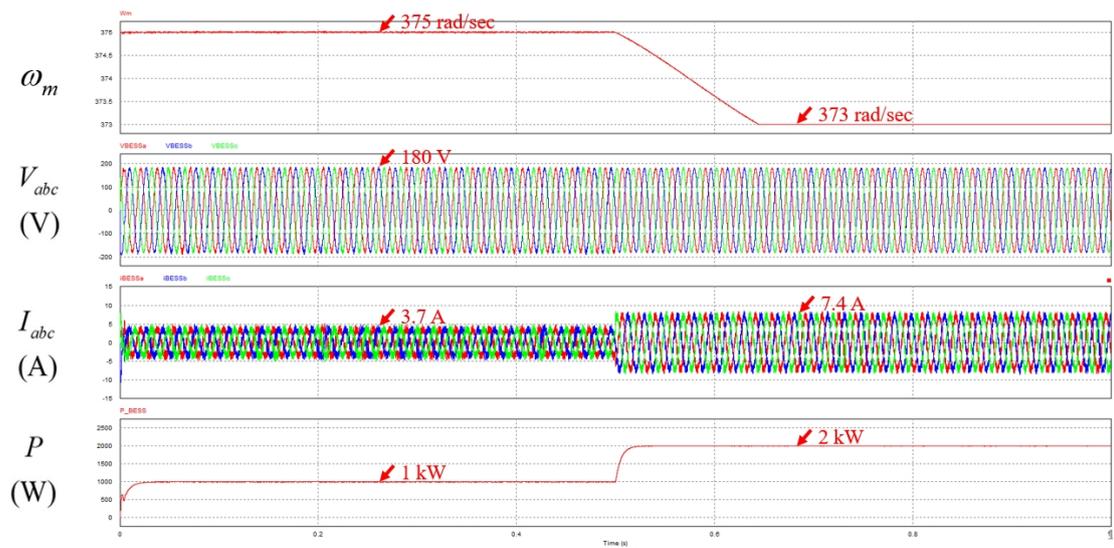


圖 2.28 系統頻率及三相六臂變流器之儲能系統之電壓、電流、功率

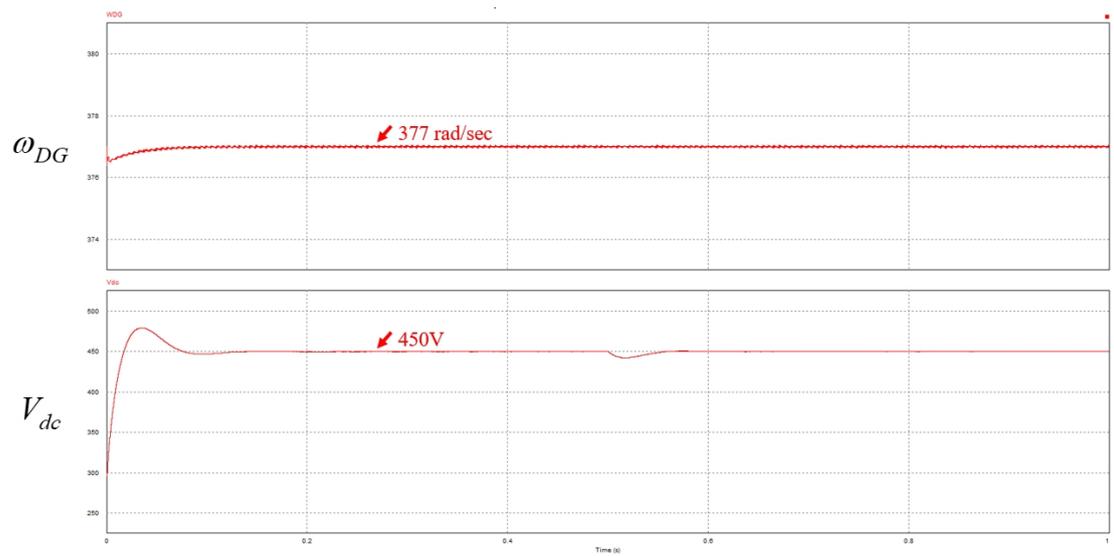


圖 2.29 柴油發電機之頻率及直流鏈電壓

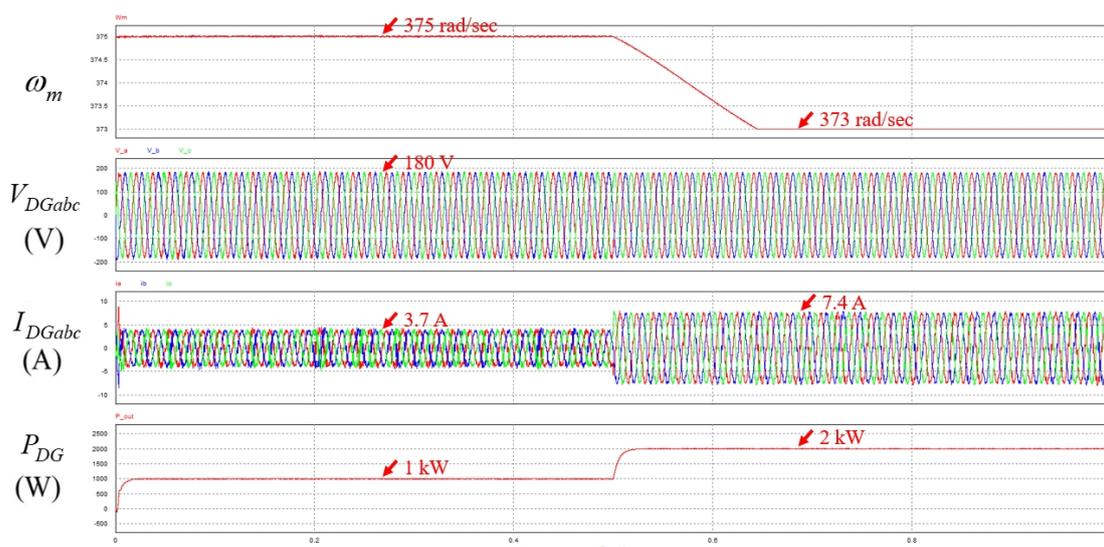


圖 2.30 系統頻率及柴油發電機結合 AC/DC、DC/AC inverter 之電壓、電流、功率

2. CASE 2， $t = 0.2$ s 儲能系統併網， $t = 0.8$ s 時負載 2 kW 變 4 kW

本情境三相六臂變流器之儲能系統採 Droop 控制架構，如圖 2.26 所示，Droop 的斜率為 500 W/(rad/sec)，在 $t = 0.2$ s 時三相六臂變流器之儲能系統方與柴油發電機併聯，此外，柴油發電機亦透過 AC/DC、DC/AC inverter 作 Droop 控制，Droop 的斜率為 500 W/(rad/sec)，在 $t = 0.8$ s 時負載之實功率從 2 kW 變成 4 kW，系統頻率從 375 rad/sec 變成 373 rad/sec，系統頻率及負載之電壓、電流、功率如圖 2.31 所示，三相六臂變流器之儲能系統，在 $t = 0.2$ s 時與柴油發電機併聯，在 $t = 0.8$ s 時三相六臂變流器之儲能系統之實功率依據 Droop 特性從 1 kW 變成 2 kW，系統頻率及三相六臂變流器之儲能系統之電壓、電流、頻率如圖 2.32 所示，柴油發電機，在 $t = 0.8$ s 時柴油發電機亦依據 Droop 特性實功率從 1 kW 變成 2 kW，柴油發電機之頻率及直流鏈電壓如圖 2.33 所示，系統頻率及柴油發電機結合 AC/DC、DC/AC inverter 之電壓、電流、功率如圖 2.34 所示，

由圖 2.31、2.32 及 2.34 中可看出，因分散式電源均採 Droop 控制，當儲能系統在 $t = 0.2$ s 併網瞬間，因兩台之頻率與電壓不一致，將造成系統頻率、電壓、電流、功率震盪現象。

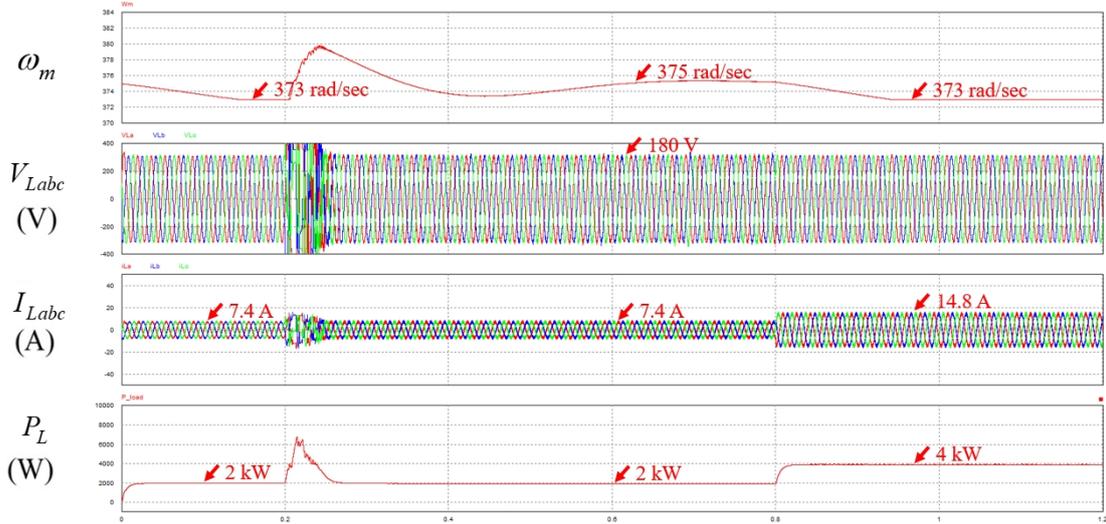


圖 2.31 系統頻率及負載之電壓、電流、功率

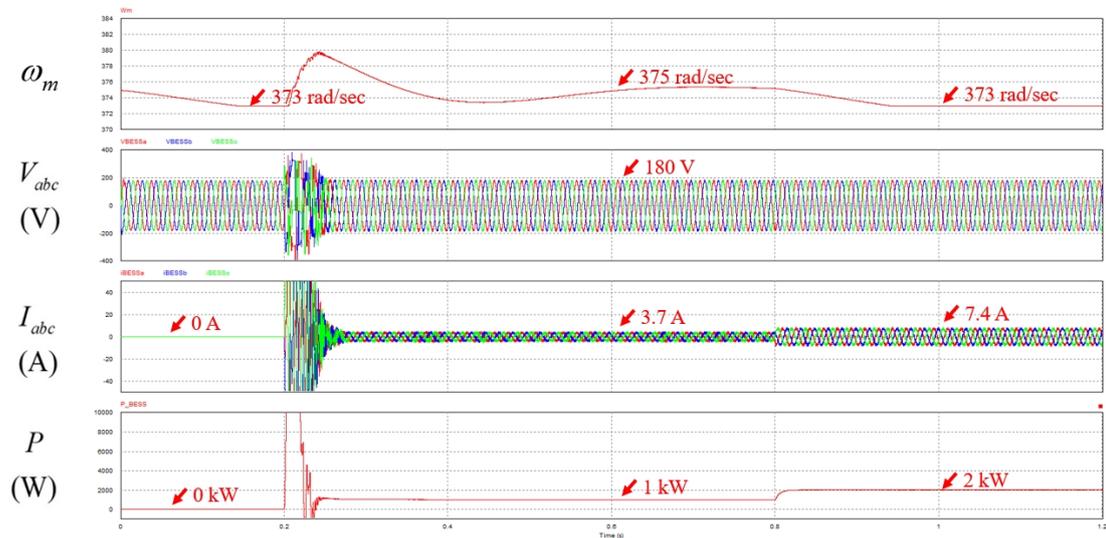


圖 2.32 系統頻率及三相六臂變流器之儲能系統之電壓、電流、功率

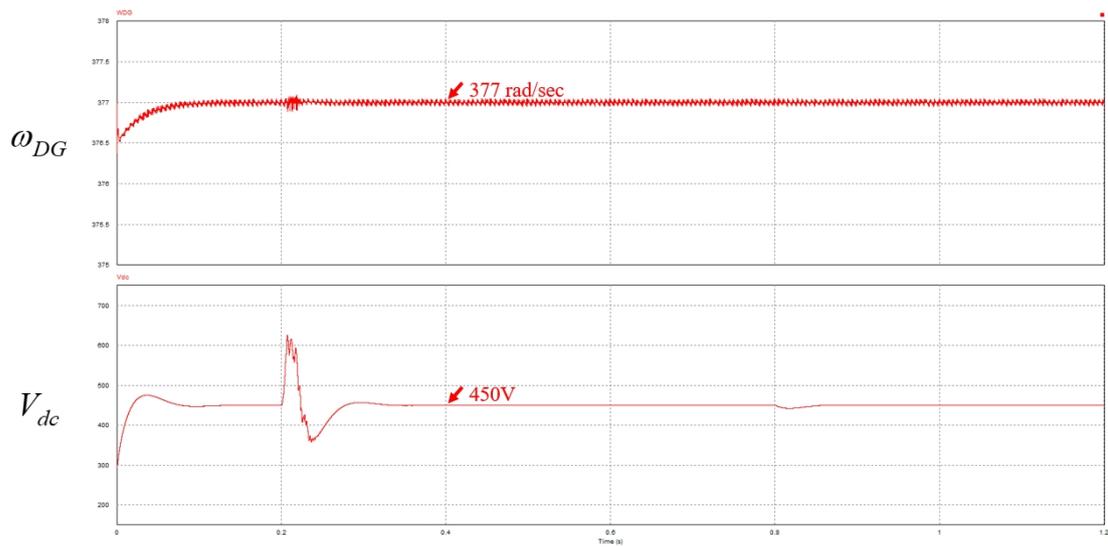


圖 2.33 柴油發電機之頻率及直流鏈電壓

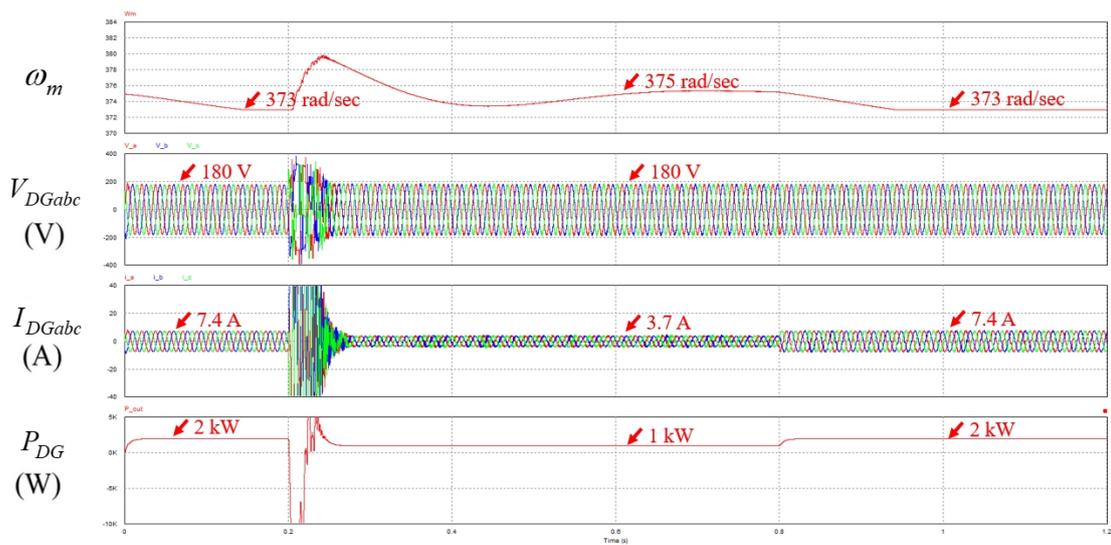


圖 2.34 系統頻率及柴油發電機結合 AC/DC、DC/AC inverter 之電壓、電流、功率

八、使用 PSIM 模擬上述情境下，於線上逐漸降低柴油發電機輸出功率，到停止功率輸出時，由三相六臂變流器之儲能系統提供主要電壓源，其系統電網電壓、頻率之暫穩態響應情形

本情境微電網系統所建立之架構圖，亦如圖 2.17 所示，微電網架構分為三個部分，第一部分為儲能系統以三相六臂變流器所組成，第二部分為柴油發電機及 AC/DC、DC/AC inverter 所組成，第三部分為負載。本情境將區分為以下兩種模擬 Case。

1. CASE 1，儲能跟柴油發電機均做 Droop 控制， $t = 0.5$ s 柴油發電機關機。

本模擬情境三相六臂變流器之儲能系統作 Droop 控制，Droop 的斜率為 $500 \text{ W}/(\text{rad}/\text{sec})$ ，此外，柴油發電機透過 AC/DC、DC/AC inverter 亦作 Droop 控制，Droop 的斜率亦為 $500 \text{ W}/(\text{rad}/\text{sec})$ ，柴油發電在 $t = 0.5$ s 關機，負載之實功率為 2 kW，系統頻率將從 375 rad/sec 變成 373 rad/sec，系統頻率及負載之電壓、電流、功率如圖 2.35 所示，三相六臂變流器之儲能系統，在 $t = 0.5$ s 時之實功率依據 Droop 特性從 1 kW 變成 2 kW，系統頻率及三相六臂變流器之儲能系統之電壓、電流、功率如圖 2.36 所示，柴油發電機在 $t = 0.5$ s 時關機，柴油發電機之實功率從 1 kW 變成 0 kW，柴油發電機之頻率及直流鏈電壓如圖 2.37 所示，系統頻率及柴油發電機結合 AC/DC、DC/AC inverter 之電壓、電流、功率如圖 2.38 所示。由圖 2.35、2.36 及 2.38 可知，柴油發電機在 $t = 0.5$ s 時關機時，三相六臂變流器之儲能系統，將依據 Droop 特性變動輸出功率以滿足供需平衡，此外，系統電壓與頻率無太大暫態響應波動。

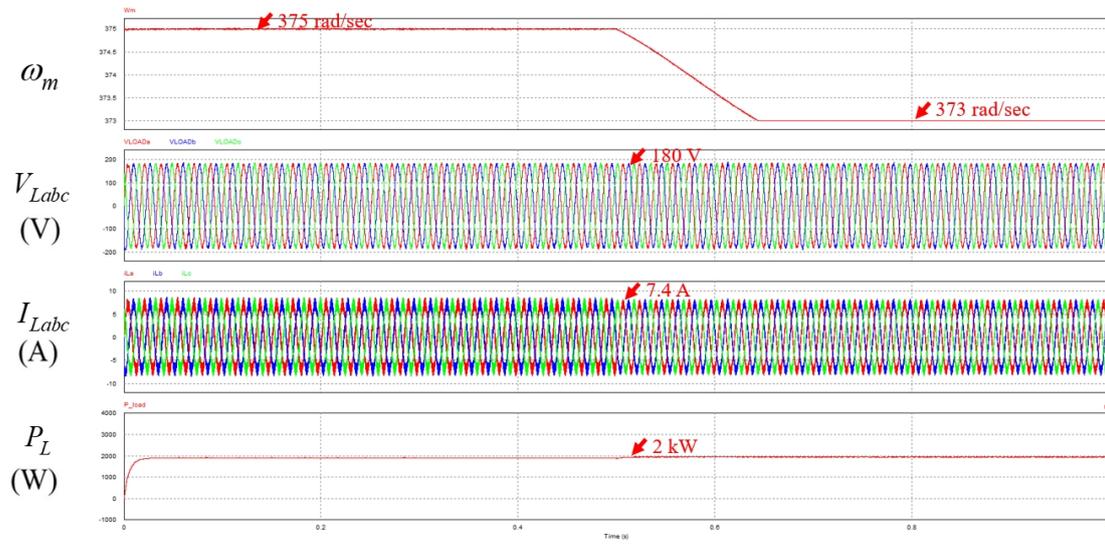


圖 2.35 系統頻率及負載之電壓、電流、功率

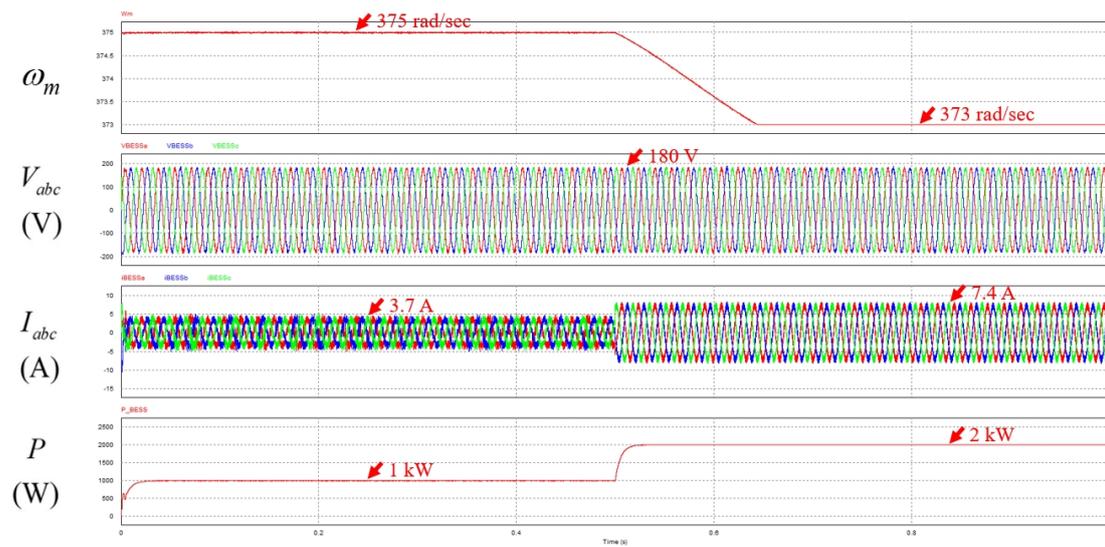


圖 2.36 系統頻率及三相六臂變流器之儲能系統之電壓、電流、功率

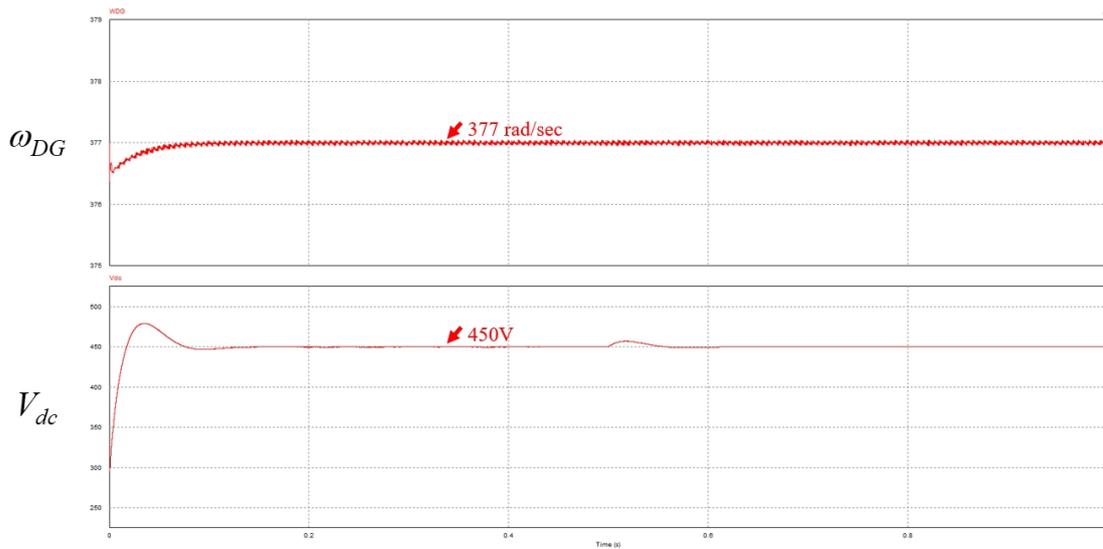


圖 2.37 柴油發電機之頻率及直流鏈電壓

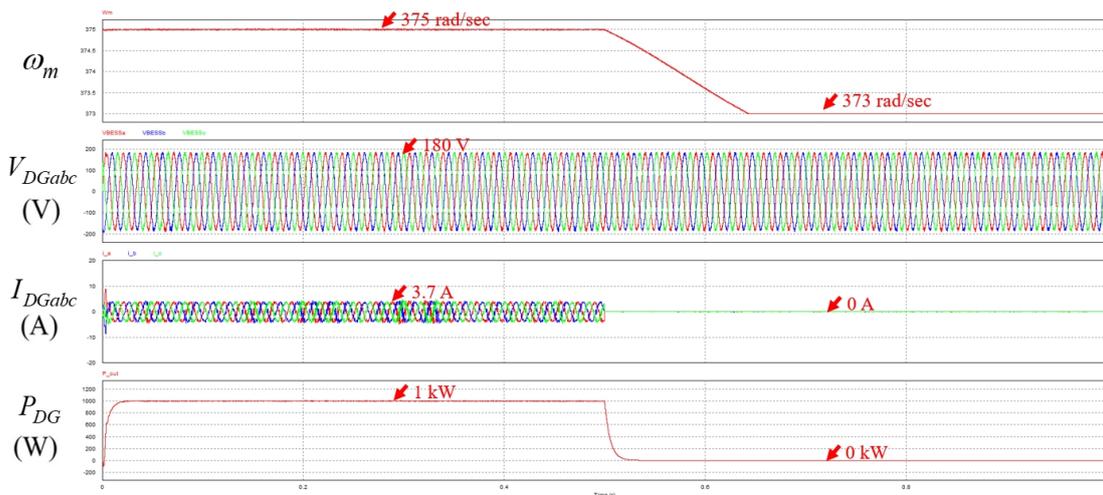


圖 2.38 系統頻率及柴油發電機結合 AC/DC、DC/AC inverter 之電壓、電流、功率

2. CASE 2，儲能控 PQ，柴油發電機控 droop，柴油發電機輸出功率逐漸下降到停止功率輸出

圖 2.39 為 CASE 2 之三相六臂變流器之儲能系統實、虛功率控制架構圖，三相六臂變流器之儲能系統作實虛功控制，在 $t = 0 \text{ s}$ 時實功率為 1 kW ，每隔 0.2 s 增加 0.25 kW ，此外，柴油發電機透過

AC/DC、DC/AC inverter 作 Droop 控制，droop 的斜率為 500 W/(rad/sec)，在 $t = 0$ s 時柴油發電機之實功率為 1 kW，每隔 0.2 s 減少 0.25 kW，負載之實功率為 2 kW。系統頻率每 0.2 s 增加 2.5 rad/sec，系統頻率及負載之電壓、電流、功率如圖 2.40 所示，三相六臂變流器之儲能系統之電壓、電流、功率如圖 2.41 所示，柴油發電機之頻率及直流鏈電壓如圖 2.42 所示，系統頻率及柴油發電機透過 AC/DC、DC/AC inverter 之電壓、電流、功率如圖 2.43 所示。由圖 2.40、2.41 及 2.43 可知，柴油發電機依據 Droop 特性變動減少輸出功率，此時，三相六臂變流器之儲能系統亦依據負載所需適時調整功率命令，以達系統穩定與供需。

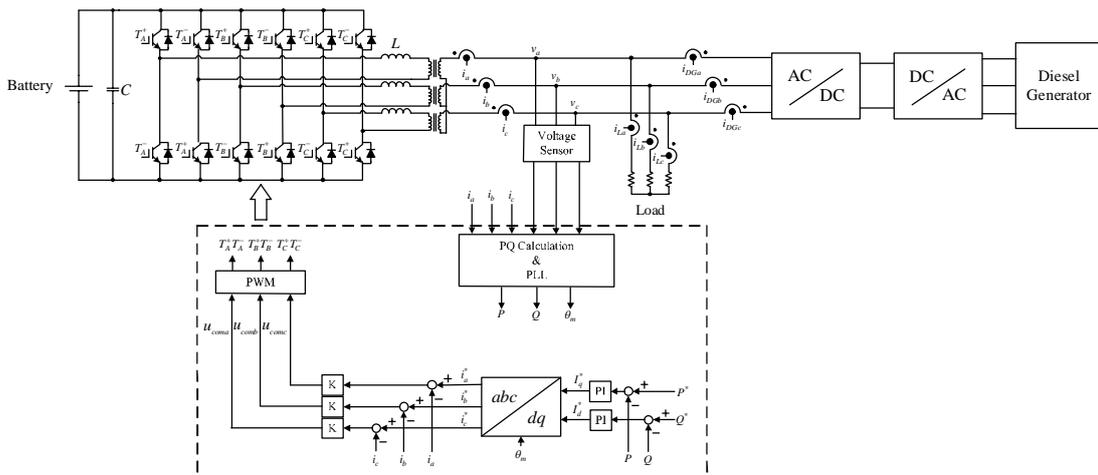


圖 2.39 三相六臂變流器之儲能系統實虛功率控制架構圖

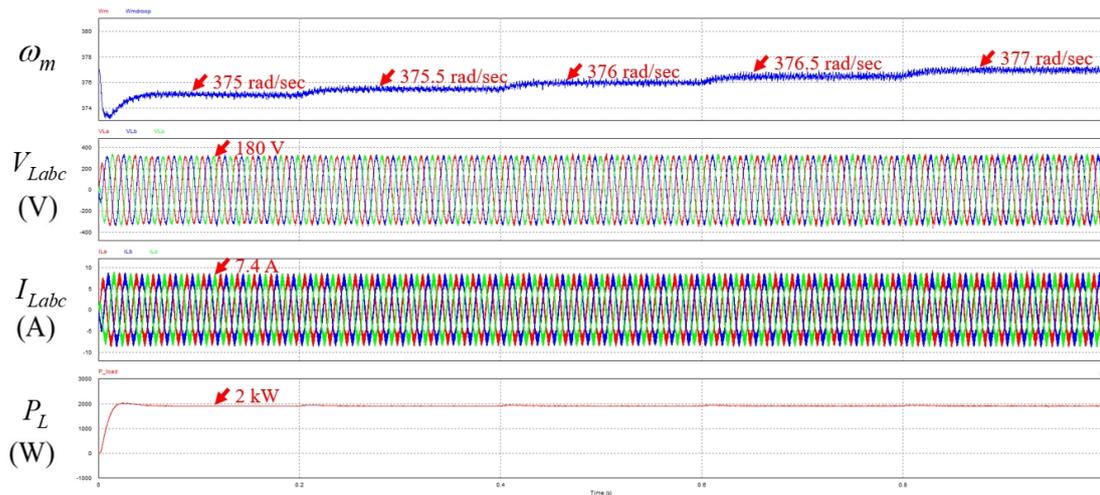


圖 2.40 系統頻率及負載之電壓、電流、功率

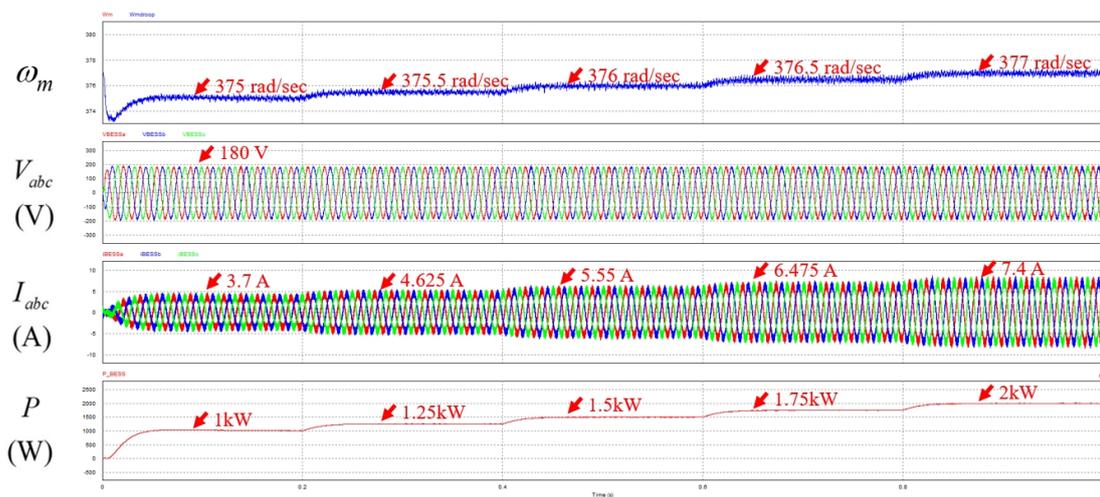


圖 2.41 系統頻率及三相六臂變流器之儲能系統之電壓、電流、功率

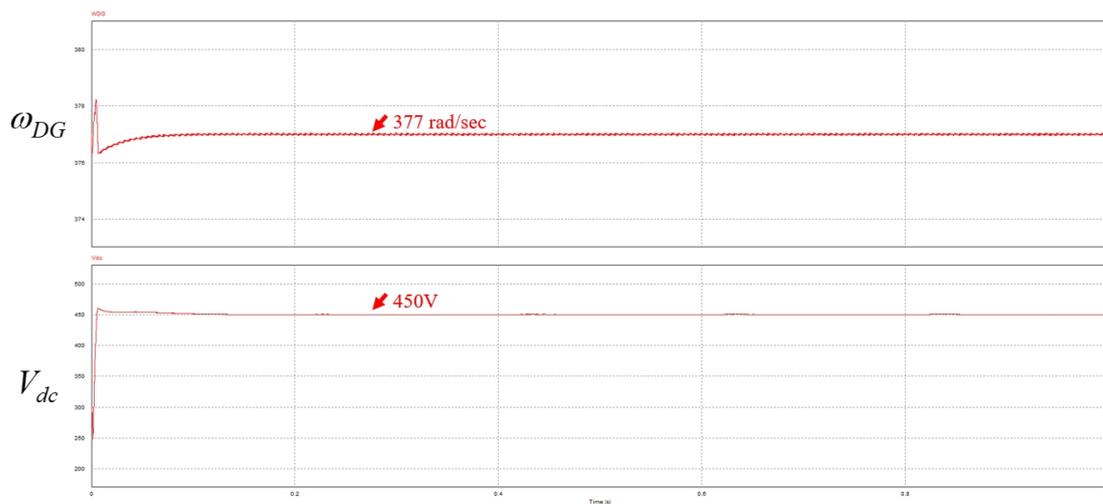


圖 2.42 柴油發電機之頻率及直流鏈電壓

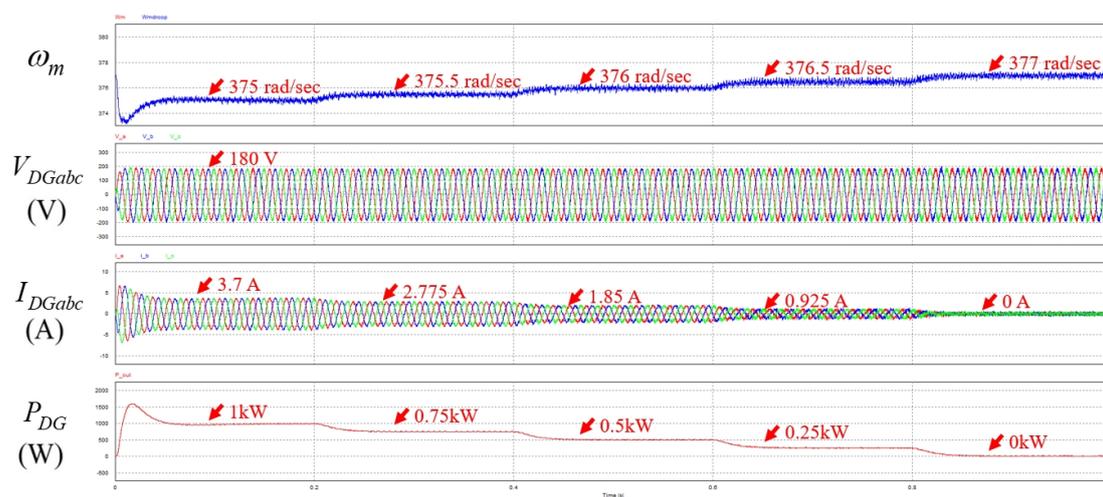


圖 2.43 系統頻率及柴油發電機結合 AC/DC、DC/AC inverter 之電壓、電流、功率

九、使用 PSIM 模擬三相六臂變流器之儲能系統與柴油發電機併聯穩定運轉下，三相負載不平衡對微電網配電饋線系統之影響，並開發三相六臂變流器之儲能系統於不平衡情境下之補償策略

本情境將區分為下列幾種模擬 Case，分別為在不平衡負載未補

償時之情況、不平衡負載結合補償法則之情況。

1. CASE 1， $t = 0.5\text{ s}$ 時 a 相負載 $48.4\ \Omega$ 變 $32.3\ \Omega$ ，沒有補償

圖 2.44 為 CASE 1 之三相六臂變流器之儲能系統補償不平衡控制架構圖，為探討補償前與補償後之效果，在 CASE 1 三相六臂變流器之儲能系統補償不平衡控制策略先禁用，故只留不平衡負載及柴油發電機。在 $t = 0.5\text{ s}$ 時 a 相負載從 $48.4\ \Omega$ 變成 $32.26\ \Omega$ ，b 相及 c 相負載均為 $48.4\ \Omega$ ，負載之電壓、電流如圖 2.45 所示，柴油發電機提供負載所需之電壓、電流如圖 2.46 所示，三相六臂變流器之儲能系統不補償。由圖 2.45 與 2.46 可知柴油發電機因受不平衡負載影響，故其輸出電流亦不平衡。

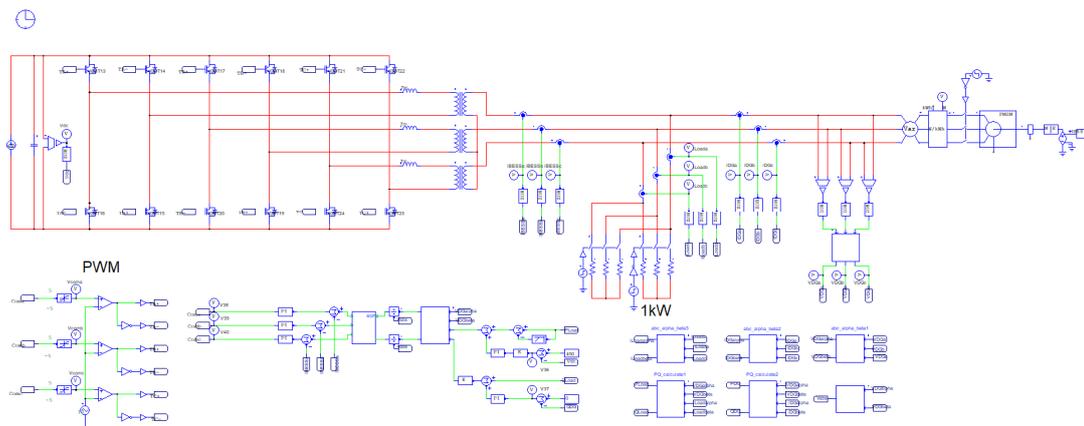


圖 2.44 三相六臂變流器之儲能系統控制架構圖

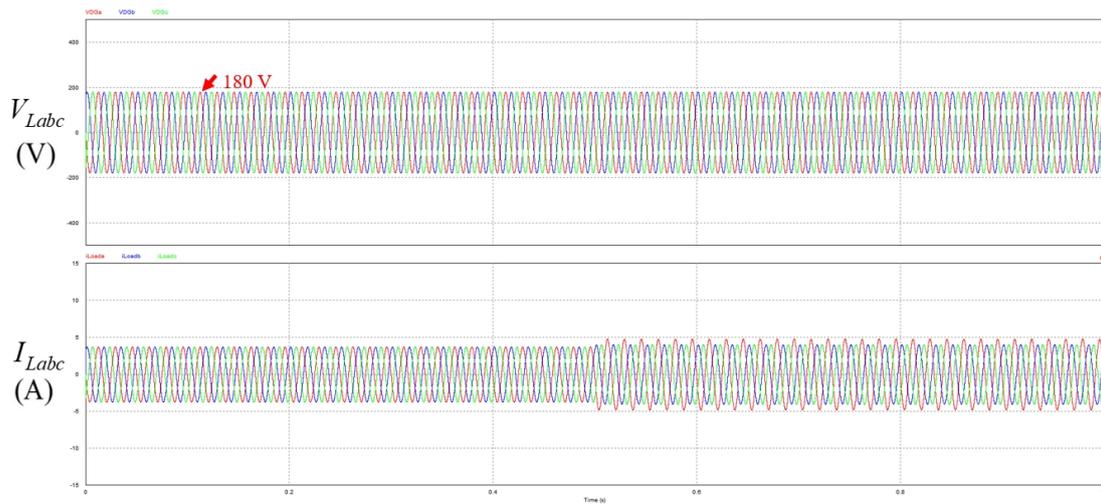


圖 2.45 負載之電壓、電流

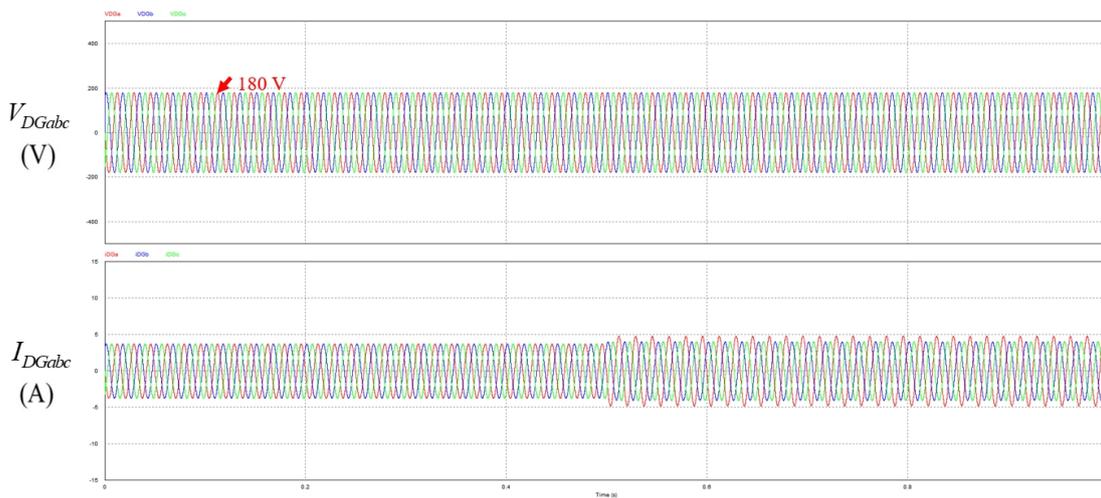


圖 2.46 柴油發電機之電壓、電流

2. CASE 2， $t = 0.5$ s 時 a 相負載 48.4Ω 變 32.3Ω ，有補償

在 CASE 2 中三相六臂變流器之儲能系統補償不平衡控制策略加入電網以補償不平衡，在 $t = 0.5$ s 時 a 相負載從 48.4Ω 變成 32.3Ω ，b 相及 c 相負載為 48.4Ω ，負載之電壓、電流如圖 2.47 所示，柴油發電機提供負載所需之電壓、電流如圖 2.48 所示，三相六臂變流器之儲能系統補償柴油發電機之不平衡電流，三相六臂變流器之儲能

系統之電壓、電流如圖 2.49 所示。由圖 2.48 及 2.49 可知，儲能系統依據補償策略輸出補償電流，以使柴油發電機三相輸出電流達平衡狀態，因此，補償法則可驗證其有效性。

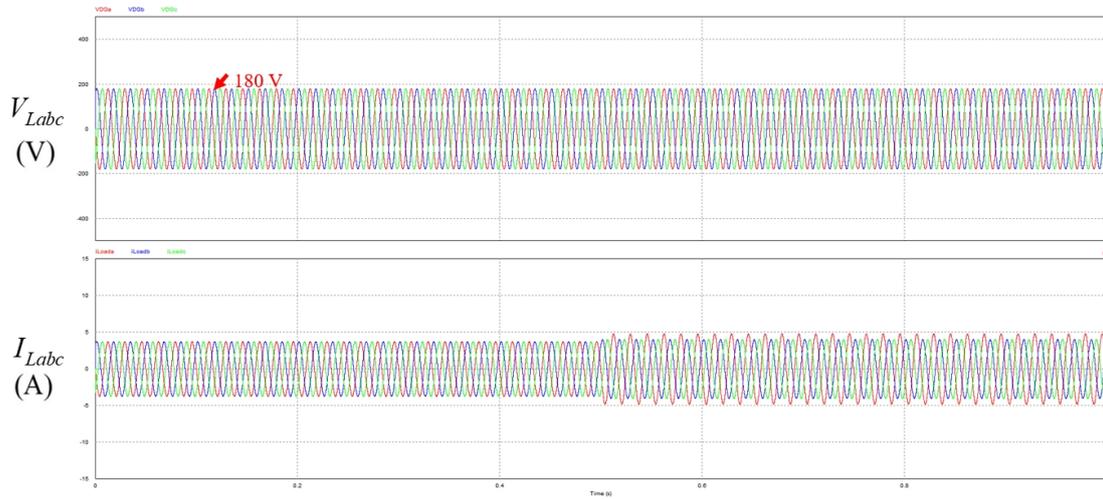


圖 2.47 負載之電壓、電流

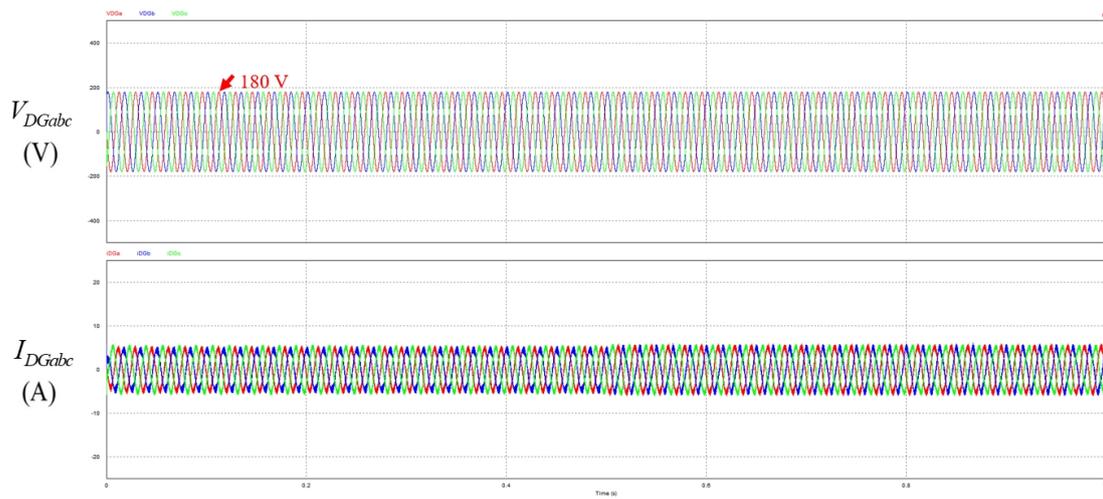


圖 2.48 柴油發電機之電壓、電流

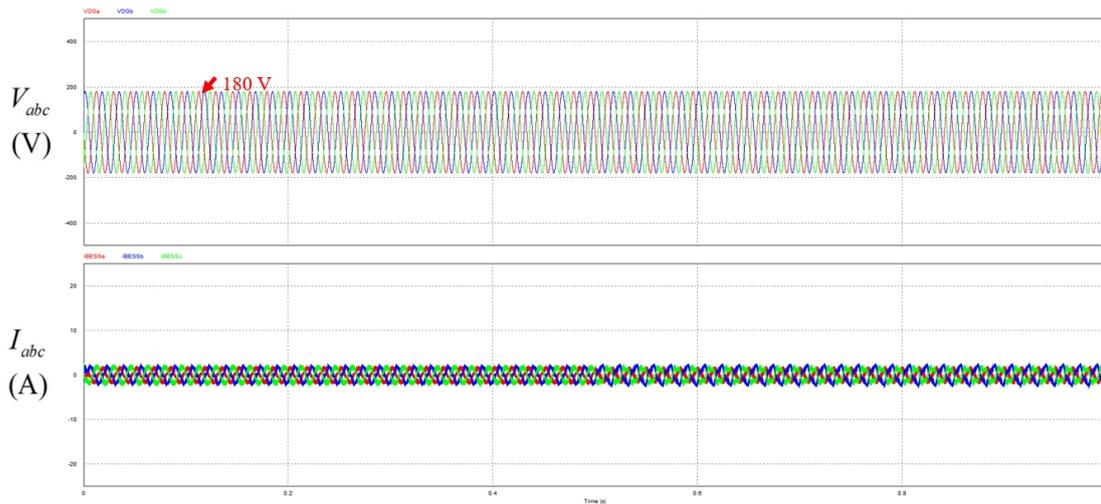


圖 2.49 三相六臂變流器之儲能系統之電壓、電流

3. CASE 3， $t = 0.5$ s 時 a 相負載 48.4Ω 變 72.6Ω ，有補償

此情境在 $t = 0.5$ s 時 a 相負載從 48.4Ω 變成 72.6Ω ，b 相及 c 相負載為 48.4Ω ，負載之電壓、電流如圖 2.50 所示，柴油發電機提供負載所需之電壓、電流如圖 2.51 所示，三相六臂變流器之儲能系統補償柴油發電機之不平衡電流，三相六臂變流器之儲能系統之電壓、電流如圖 2.52 所示。由圖 2.51 及 2.52 可知，儲能系統結合補償策略，可使柴油發電機三相輸出電流達平衡狀態。

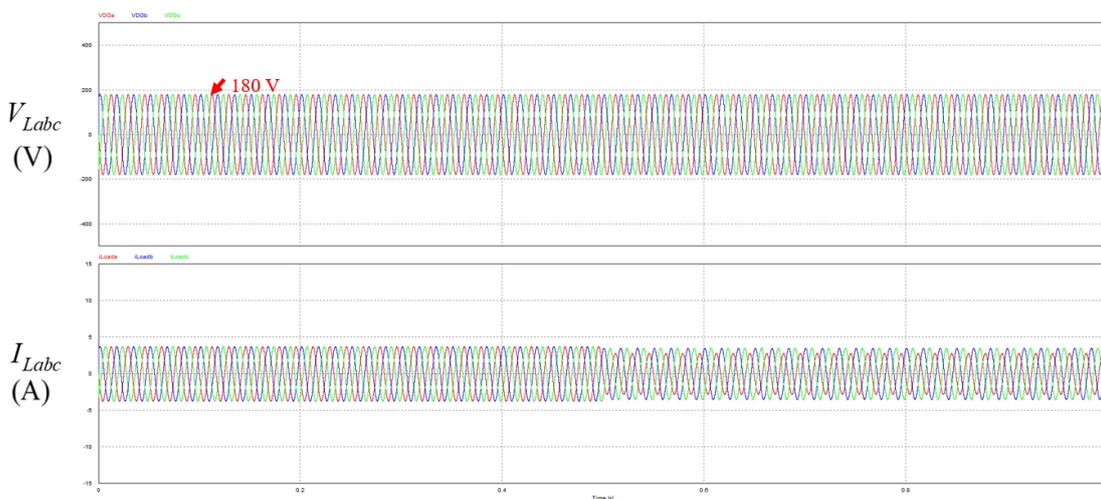


圖 2.50 負載之電壓、電流

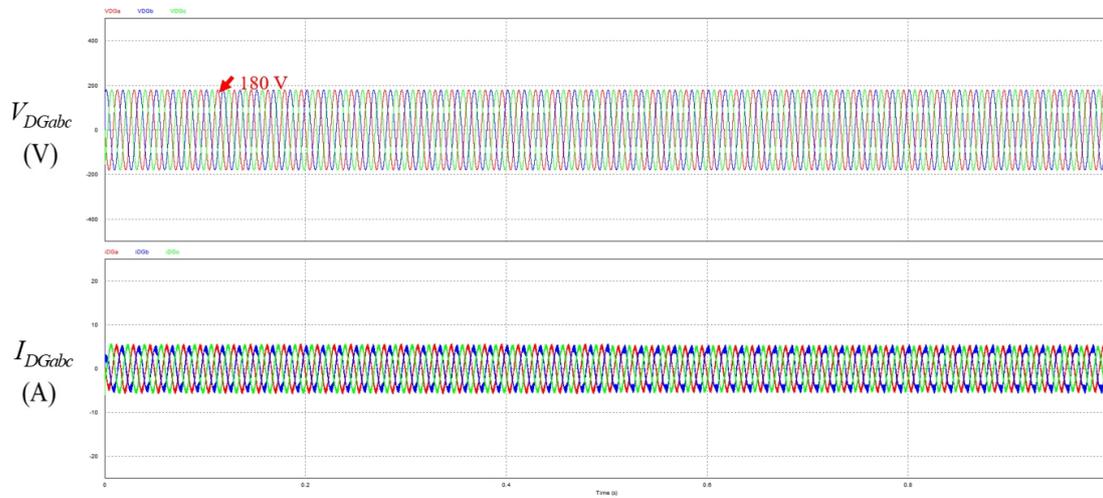


圖 2.51 柴油發電機之電壓、電流

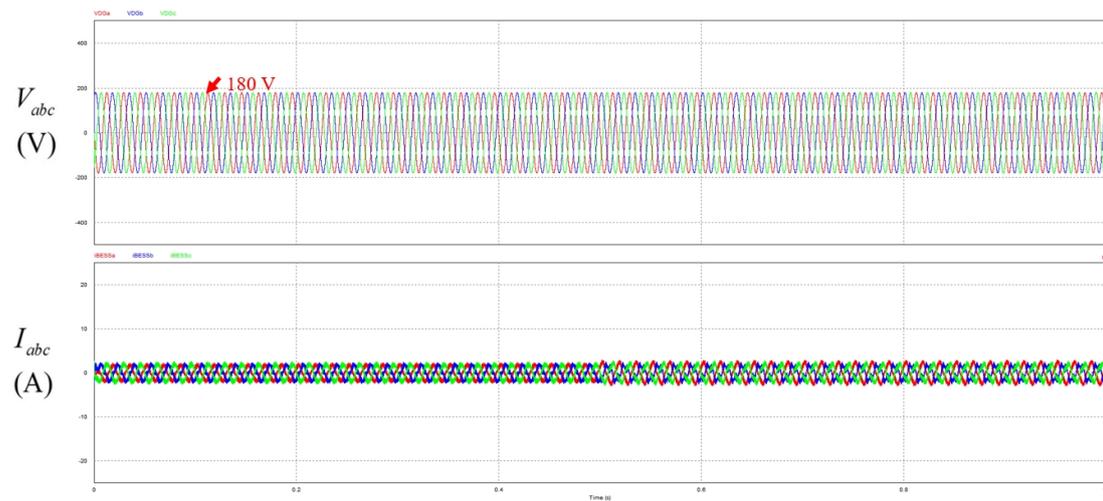


圖 2.52 三相六臂變流器之儲能系統之電壓、電流

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，其微電網系統包含柴油發電機、儲能系統與三相負載，並透過 PSIM 驗證微電網系統相關控制法則。此外，本計畫亦研究微電網內各分散式電源饋線系統間調控技術與轉供策略，並透過補償三相不平衡負載，以強化微電網系統之穩定性。此外，並探討分散式電源在不同運作模式之間互相轉供策略以維護微電網系統之穩定性。由相關模擬結果可分析分散式電源在孤島運轉下不同控制法則對電網之衝擊與穩定性。

目前研究成果，國際期刊論文一篇。

1. Cheng-I Chen, Yeong-Chin Chen, Chung-Hsien Chen, and Yung-Ruei Chang, “Voltage Regulation Using Recurrent Wavelet Fuzzy Neural Network-Based Dynamic Voltage Restorer,” *Energies*, 13, 6242, 2020, pp. 1-19.

肆、參考文獻

- 1.張永瑞、姜政綸、李奕德。「微電網發展前景及技術剖析」。臺灣能源期刊，第二卷第三期，第 259-278 頁。中華民國 104 年 9 月。
- 2.談光雄，「微電網之運轉與智慧型控制」，國防大學理工學院國防科學研究所，博士論文，民國 102 年。
- 3.IEEE Standard 929-2000, "IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic(PV) Systems," IEEE Standard, New York, USA, pp. 1-26, 2000.
- 4.IEEE Standard 1547-2003, "IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems," IEEE Standard, New York, USA, pp. 1-16, 2003.
- 5.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.
- 6.N. W. A. Lidula and A. D. Rajapakse, "Voltage balancing and synchronization of microgrids with highly unbalanced loads," v, Mar. 2014, pp. 907-920.
- 7.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.
- 8.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.