

行政院原子能委員會

委託研究計畫期末研究報告

百瓩級風力機變頻器最佳化設計

**Design of Power Conversion Interface for  
Hundred kW Wind Generation System**

計畫編號：1062001INER012

受委託單位：國立高雄應用科技大學

計畫主持人：周宏亮

聯絡電話：07-3814526 ext.5519

E-mail address：hljou@mail.ee.kuas.edu.tw

協同主持人：吳晉昌

參與研究生：沈鴻任、林建豪、林建任、張庭源

研究期程：中華民國 106 年 03 月 23 日至 106 年 12 月 31 日

研究經費：新臺幣 46 萬元

核研所聯絡人員：吳東昇先生

報告日期：中華民國 106 年 11 月 15 日

## 目 錄

目 錄.....	i
中文摘要.....	iii
ABSTRACT.....	iv
壹、計畫緣起與目的.....	1
一、計畫緣起.....	1
二、計畫目的.....	3
貳、研究方法與過程.....	4
一、整合風力、太陽能與電池儲能發電系統之電能轉換界面架構..	4
(一)、雙向直流-交流電能轉換器.....	7
(二)、升壓直流-直流電能轉換器.....	17
(三)、雙向直流-直流電能轉換器.....	20
參、模擬結果.....	24
(一)、具電池儲能之併網型風力發電電能轉換介面.....	24
(二)、具電池儲能之獨立型風力發電電能轉換介面.....	40
(三)、具電池儲能之併網型太陽能發電電能轉換介面.....	57
(四)、具電池儲能之獨立型太陽能發電電能轉換介面.....	61
(五)、電池充放電之電能轉換介面.....	77
(六)、整合風光電發電系統之併網型直流耦合式電能轉換介面.....	8

(七)、整合風光電發電系統之獨立型直流耦合式電能轉換介面 ..	109
肆、主要發現與結論.....	128
伍、參考文獻.....	129
陸、附錄.....	133
(一)、國外研討會論文 .....	133
(二)、國內研討會論文 .....	140

## 中文摘要

本計畫之目的在發展一種整合風光電之發電系統之直流耦合式電能轉換界面。該直流耦合式電能轉換界面係由一小型風力發電機、一太陽能電池陣列、一儲能電池組、一升壓直流-直流電能轉換器、一雙向直流-直流電能轉換器、一交流-直流電能轉換器及一直流-交流電能轉換器所組成，小型風力發電機、太陽能電池陣列與儲能電池組分別經交流-直流電能轉換器、升壓直流-直流電能轉換器與雙向直流-直流電能轉換器耦合到共用直流匯流排，共用直流匯流排則連接至一共用之直流-交流電能轉換器，而此直流-交流電能轉換器之交流側連接至市電與負載。本計畫之直流耦合式電能轉換界面可運轉於併網與獨立運轉，計畫中將探討電能轉換界面於風光互補應用下併網與獨立運轉之運轉策略。為驗證所發展之直流耦合式電能轉換界面於併網與獨立運轉下之功能，本計畫將進行電腦模擬以驗證其可行性，模擬結果證明其可達成預期之功能。

關鍵字：風力，太陽能，電池儲能，直流耦合式

## Abstract

A DC coupling power converter interface for integrating wind power/ solar power/ battery energy storage is developed in this project. The DC coupling power converter interface is composed of a small wind generator, a solar cell array, a battery set, a boost DC-DC power converter, a bidirectional DC-DC power converter, an AC-DC power converter and a DC-AC inverter. The solar cell array, the small wind generator and the battery set are coupled to the common DC bus through a DC-DC boost power converter, an AC-DC power converter and a bidirectional DC-DC power converter, respectively. The DC-AC inverter converts the integrated DC power of the common DC bus to AC power and then supply to the utility grid or loads. This DC coupling power converter interface can operate in both the grid-connection and stand-alone modes. In this project, the operation strategies of the DC-coupling power converter interface for wind/solar/battery set power under the grid-connected mode and stand-alone mode are studied. To verify the performance of this DC coupling power converter interface under the grid-connection mode and the stand-alone mode, computer simulation is carried out. Simulation results verify that the performance of the developed DC coupling power converter interface is as expected.

Keywords: wind power, solar power, battery energy storage, DC coupling

## 壹、計畫緣起與目的

### 一、計畫緣起

臺灣由於自產能源相當匱乏，所需之能源幾乎依賴進口，對化石能源之依存度甚高，近年能源價格波動劇烈，且因化石能源之過度使用造成環境污染、全球暖化與全球氣候變遷，形成地球生態浩劫[1-3]。為改善全球氣候變遷問題，全球溫室氣體減量之壓力日增，而國內之能源需求仍持續成長，臺灣之能源發展所面臨之挑戰甚為嚴峻。為減輕石化能源對環境的嚴重衝擊，因此有京都議定書、哥本哈根協議與巴黎協定以達成對抗全球氣候變遷協定，期能減少溫室氣體排放量，強化國際抗暖化。如何減少對傳統石化能源的依賴及節能減碳抗暖化已成為目前之普世價值，因此積極發展再生能源已經是不可避免之趨勢。政府為凝聚各界之共識以達到確保國內能源安全、兼顧經濟發展、民生負擔及環境保護，並能因應未來國際政經、能源情勢變動及核四封存後之電力供需不確定性與非核家園等挑戰；為達成上述目的，必需努力做到需求有效節流、供給穩定開源與環境低碳永續 [4]。為減少對進口能源之依賴與減少碳排放，政府積極推動再生能源，並已將綠能科技列為政府擇定之五大創新產業之一[5]，而太陽能與風能為最重要之發展重點。

風能與太陽能為目前最具經濟效益之再生能源，如果能夠有效並廣泛的利用風能與太陽能，不但可以減少對石化能源的依賴，更可以減少石化能源造成之環境汙染、降低全球之溫室效應與改善全球氣候變遷，因此世界各主要國家皆積極發展風能與太陽能於發電之應用。台灣基於能源種類來源多元化、環境保護、減少對石化能源之依賴與開發永久性能源的觀點而言，發展太陽能與風能等綠能科技已成為政府目前之施政重點。由於太陽能與風能均會隨著自然條件如太陽光強度、溫度及風速等之變化而變化，而太陽能發電與風力發電具有互補之特點，因此”風光互補”非常適合將其整合應用，期望能有助於提升再生能源發電量之穩定。

依據 2015 World Wind Energy Association (WWEA) [6]與金屬工業中心之資料[7]顯示全球有十幾個國家有小型風電之固定價格之收購機制，WWEA[6]之報告顯示至 2013 年全球裝設之小型風機組已超過 87 萬組，至於國內依據核能研究所之資料顯示雖然國內小型風力機裝置量較低，但若以出貨量來看，臺灣僅次於中國、美國與英國，位居全球第四位[8]，因此國內於小型風力機仍然有相當之發展潛力。因此，有必要積極集中國內產官學研各界之研發能量，發展包含電能轉換界面等相關之風力發電核心技術，以擴

展小型風力發電機之應用與開發。台灣於太陽能產業中之矽晶圓與電池之產量皆僅次於中國，位居全球第二位，相當有發展潛力。

## 二、計畫目的

由於風能與太陽能皆為不穩定之能源，容易受到天氣、環境與季節等因素之影響，並具有間歇性，使其輸出功率不但不穩定且不容易預測，當大量建置時，其不穩定性將影響電網之電力品質，其可能造成電網之電壓與頻率波動，嚴重的影響到電網的可靠度、穩定度及電力品質。為改善風能與太陽能之間歇性與不穩定性對電網之衝擊，提高風能與太陽能之併網穿透率，外加儲能系統為一可行之解決方案[9-11]。而整合風光電之發電系統之電能轉換界面其可應用於併網或獨立運轉[12-21]。

本計畫之目的在發展一整合風光電之發電系統之直流耦合式電能轉換界面，所發展之直流耦合式電能轉換界面可於併網與獨立運轉下操作。計畫中將探討電能轉換界面於併網與獨立運轉時之運轉策略，並將進行電腦模擬以驗證所發展之整合風力、太陽能與電池儲能之直流耦合式電能轉換界面於併網與獨立運轉下之功能。



## 貳、研究方法與過程

### 一、整合風力、太陽能與電池儲能發電系統之電能轉換界面架構

整合風力、太陽能與電池儲能發電系統之直流耦合式電能轉換界面之電路架構如圖 1 所示。其由一小型風力發電機、一太陽能電池陣列、一電池組、一升壓直流-直流電能轉換器、一雙向直流-直流電能轉換器、一交流-直流電能轉換器及一雙向直流-交流電能轉換器所組成，太陽能電池陣列及電池組分別經由升壓直流-直流電能轉換器及雙向直流-直流電能轉換器連接到共用直流匯流排，而小型風力發電機經由交流-直流電能轉換器連接到共用直流匯流排，共用直流匯流排並經由一共用之雙向直流-交流電能轉換器連接至交流匯流排供電給市電或負載，由於電池組經單獨之雙向直流-直流電能轉換器連接至直流匯流排，在實際應用上電池組所需之電池串聯數量較有彈性，且電池組之充放電較容易控制而可延長電池組之壽命，由圖 1 可發現風能與太陽能經直流匯流排對電池組充電只須經兩級電能轉換器，所以系統之充電效率較高。此架構為風能、太陽能與電池儲能於直流匯流排連接至一共用之直流-交流電能轉換器，使整個電能轉換界面僅包含四個電能轉換器，電路架構最簡單，而硬體成本較低。

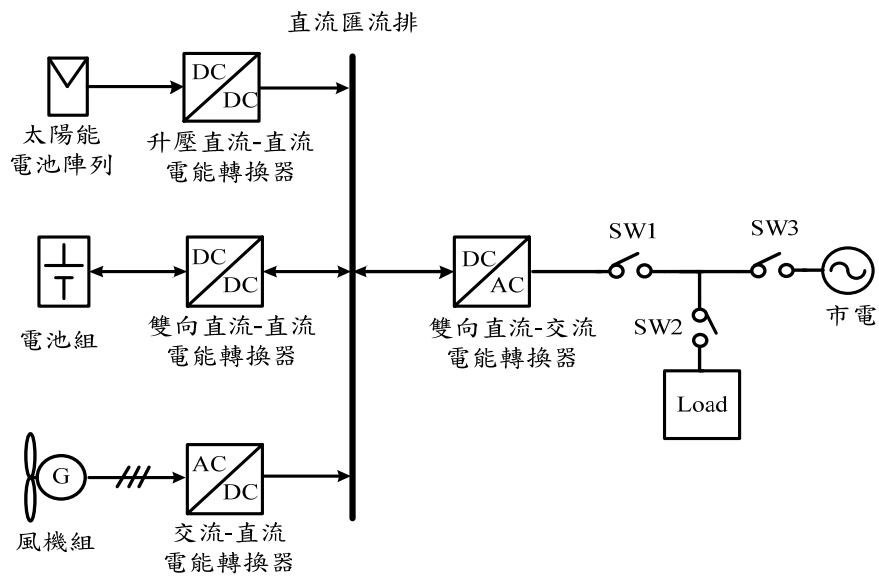


圖 1 整合風力、太陽能與電池儲能之發電系統之直流耦合式電能轉換  
換界電路架構。

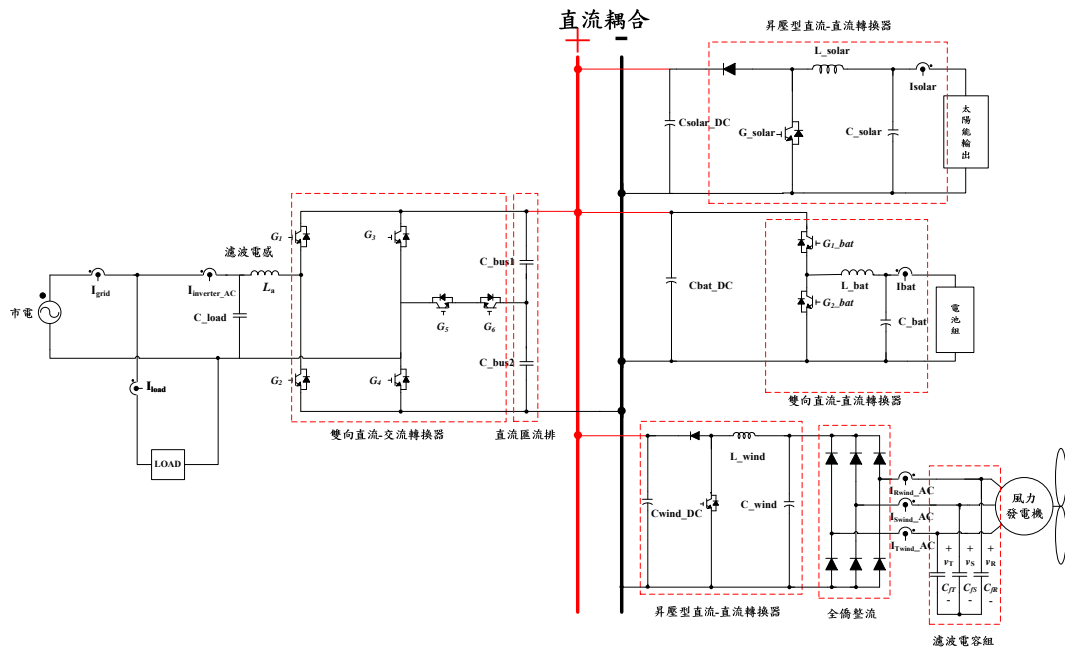


圖 2 整合風力、太陽能與電池儲能發電系統之直流耦合式電能轉換  
界面電路。

圖 2 為整合風力、太陽能與電池儲能發電系統之直流耦合式電能轉換界面之電路。由圖 2 可看出與太陽能電池陣列連接之直流-直流電能轉換器為一升壓型直流-直流電能轉換器，與電池組連接之直流-直流電能轉換器為一雙向升降壓型直流-直流電能轉換器，基於成本考慮目前之小型風力發電機之交流-直流電能轉換器大都採用由一三相二極體整流器與一升壓直流-直流電能轉換器組成之交流-直流電能轉換器；由於此系統之小型風力發電之永磁式同步發步發電機其容量僅為 1KW，因此採用由一三相二極體整流器與一升壓直流-直流電能轉換器組成之交流-直流電能轉換器。而與市電及負載連接之雙向直流-交流電能轉換器為一改良式雙向五階直流-交流電能轉換器。傳統之單相 T-型五階之直流-交流電能轉換器係由兩個 T-型臂共八個開關所組成，而此計畫採用之改良式單相五階直流-交流電能轉換器係由一個 T-型臂與一個傳統電力電子臂共六個開關所組成，因此可省下兩個開關。

本計畫中之市電電壓為 60Hz, 220V 之交流電壓。本計畫中之小型風力發電機為 1KW，太陽能電池陣列為 2KW，而電池組由 20 顆 100AH 鉛酸電池串聯組成[22-23]，計畫中將探討電能轉換界

面於風光互補應用下併網與獨立運轉下之運轉策略。為驗證所發展之直流耦合式之電能轉換界面於併網與獨立運轉下之功能，本計畫將進行電腦模擬以驗證其可行性。

### (一)、雙向直流-交流電能轉換器

本計畫之雙向直流-交流電能轉換器為一改良式單相 T 型五階電能轉換器[24]，此轉換器可進行直流-交流與交流-直流之雙向電能轉換。

#### 1. 交流一直流電能轉換

此雙向直流-交流電能轉換器進行交流一直流電能轉換之切換模式可分為六種，於正負半週分別各有三種模式分別說明如下：

模式一：

圖 3(a)為正半週下模式一之等效電路。此時功率開關  $S_1$  及  $S_3$  導通，而功率開關  $S_2$ 、 $S_4$ 、 $S_5$  與  $S_6$  截止。市電電流之路徑為市電經  $L_1$ 、A 點、 $S_1$  之迴輪二極體、 $S_3$  再由 B 點流回市電。

模式二：

圖 3(b)為正半週下模式二之等效電路。此時功率開關  $S_1$ 、 $S_5$  及  $S_6$  導通，而功率開關  $S_2$ 、 $S_3$  與  $S_4$  截止。市電電流之路徑為市電經  $L_1$ 、A 點、 $S_1$  之迴輪二極體、 $C_1$ 、 $S_5$ 、 $S_6$  之迴輪二極體，再由 B 點流回市電，此模式對電容  $C_1$  充電儲能。

模式三：

圖 3(c)為正半週下模式三之等效電路。此時功率開關  $S_1$  及  $S_4$  導通，而功率開關  $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_5$  與  $S_6$  截止。市電經  $L_1$ 、A 點、 $S_1$  之迴輪二極體、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $S_4$  之迴輪二極體，再由 B 點流回市電，此模式對電容  $C_1$  及  $C_2$  串聯充電儲能。

模式四：

圖 3(d)為負半週下模式四之等效電路。此時功率開關  $S_2$  及  $S_4$  導通，而功率開關  $S_1$ 、 $S_3$ 、 $S_5$  與  $S_6$  截止。市電電流之路徑為市電經 B 點、 $S_4$ 、 $S_2$  之迴輪二極體、A 點，再由  $L_1$  流回市電。

模式五：

圖 3(e)為負半週下模式五之等效電路。此時功率開關  $S_2$ 、 $S_5$  及  $S_6$  導通，而功率開關  $S_1$ 、 $S_3$  與  $S_4$  截止。市電電流之路徑為市電經 B 點、 $S_3$ 、 $S_6$  之迴輪二極體、 $C_2$ 、 $S_2$  之迴輪二極體、A 點，再由  $L_1$  流回市電，此模式對電容  $C_2$  充電儲能。

模式六：

圖 3(f)為負半週下模式六之等效電路。此時功率開關  $S_2$  及  $S_3$  導通，而功率開關  $S_1$ 、 $S_4$ 、 $S_5$  與  $S_6$  截止。市電電流之路徑為市電經 B 點、 $S_3$  之迴輪二極體、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $S_2$  之迴輪二極體、A 點，再由  $L_1$  流回市電，此模式對電容  $C_1$  及  $C_2$  串聯充電儲能。

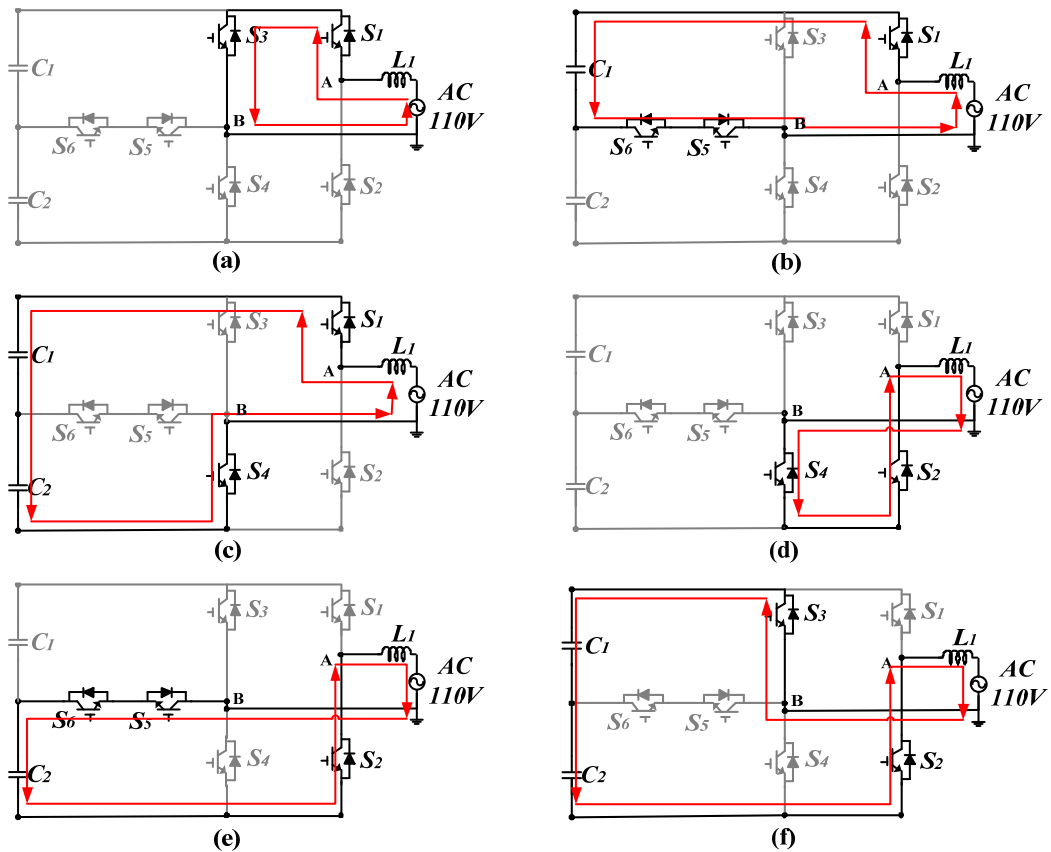


圖 3 雙向交流—直流電能轉換器之等效電路，(a) 模式一，(b) 模式二，(c) 模式三，(d) 模式四，(e) 模式五，(f) 模式六。

## 2. 直流—交流電能轉換

此雙向直流-交流電能轉換器進行直流—交流電能轉換之切換模式可分為六種，於正負半週分別各有三種模式分別說明如下：

模式一：

圖 4(a)為正半週下模式一之等效電路。此時功率開關  $S_1$  及  $S_3$  導通，而功率開關  $S_2$ 、 $S_4$ 、 $S_5$  與  $S_6$  截止。市電電流之路徑為市電經 B 點、 $S_3$  之迴輪二極體、 $S_1$ 、A 點，再由  $L_1$  流回市電。

模式二：

圖 4(b)為正半週下模式二之等效電路。此時功率開關  $S_1$ 、 $S_5$  及  $S_6$  導通，而功率開關  $S_2$ 、 $S_3$  與  $S_4$  截止。市電電流之路徑為市電經 B 點、 $S_5$ 、 $S_6$  之迴輪二極體、 $C_1$ 、 $S_1$ 、A 點，再由  $L_1$  流回市電，此模式電容  $C_1$  放電。

模式三：

圖 4(c)為正半週下模式三之等效電路。此時功率開關  $S_1$  及  $S_4$  導通，而功率開關  $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_5$  與  $S_6$  截止。市電電流之路徑為市電經 B 點、 $S_4$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $S_1$ 、A 點，再由  $L_1$  流回市電，此模式電容  $C_1$  與  $C_2$  串聯放電。

模式四：

圖 4(d)為負半週下模式四之等效電路。此時功率開關  $S_2$  及  $S_4$  導通，而功率開關  $S_1$ 、 $S_3$ 、 $S_5$  與  $S_6$  截止。市電電流之路徑為市電  $L_1$ 、A 點、 $S_2$ 、 $S_4$  之迴輪二極體，再由 B 點流回市電。

模式五：

圖 4(e)為負半週下模式五之等效電路。此時功率開關  $S_2$ 、 $S_5$  及  $S_6$  導通，而功率開關  $S_1$ 、 $S_3$  與  $S_4$  截止。市電電流之路徑為市電經  $L_1$ 、A 點、 $S_2$ 、 $C_2$ 、 $S_6$ 、 $S_5$  之迴輪二極體，再由 B 點流回市電，

此模式電容  $C_2$  放電。

模式六：

圖 4(f)為負半週下模式六之等效電路。此時功率開關  $S_2$  及  $S_3$  導通，而功率開關  $S_1$ 、 $S_4$ 、 $S_5$  與  $S_6$  截止。市電電流之路徑為市電經  $L_1$ 、A 點、 $S_2$ 、 $C_2$ 、 $C_1$ 、 $S_3$ ，再由 B 點流回市電，此模式電容  $C_1$  與  $C_2$  串聯放電。

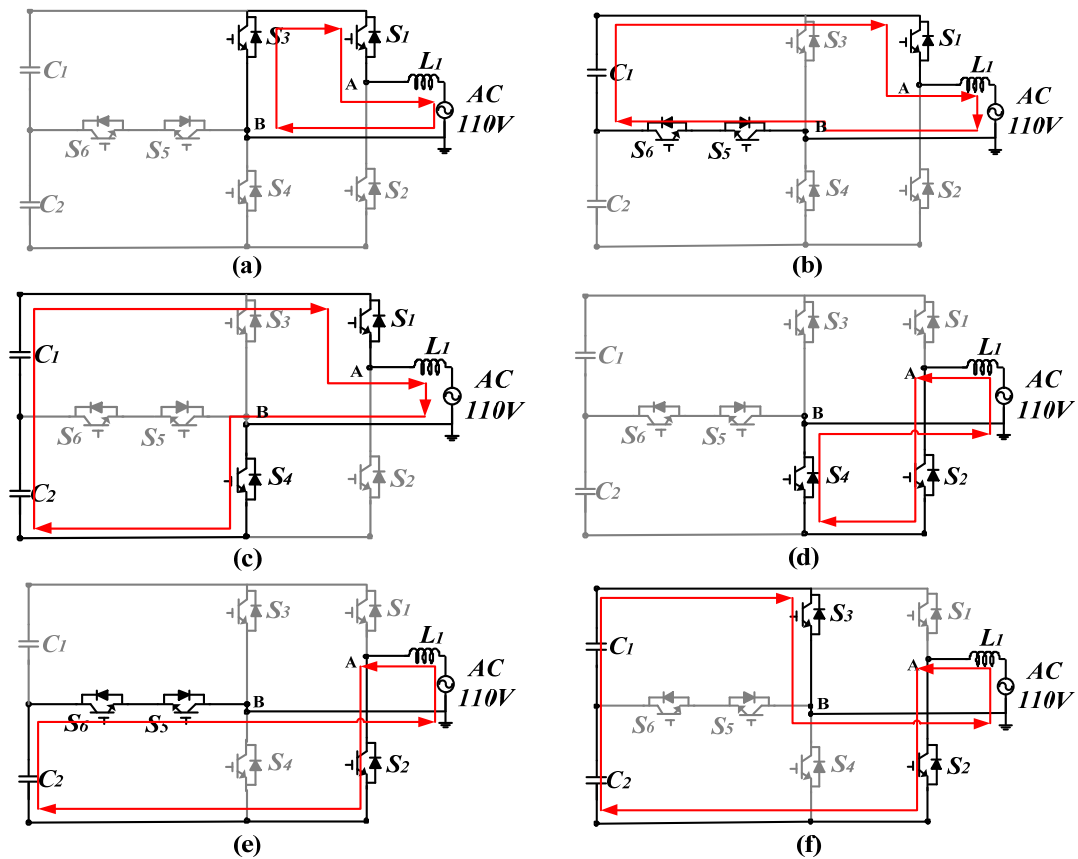


圖 4 雙向直流—交流電能轉換器之等效電路，(a) 模式一，(b) 模式二，(c) 模式三，(d) 模式四，(e) 模式五，(f) 模式六。



### 3. 雙向交流—直流電能轉換器控制原理

由市電正半週之模式一至三可觀察出，此雙向交流—直流電能轉換器，可產生三種不同電壓階層，而於市電負半週之模式四至六時，輸出電壓階層與正半週相似，圖 5 為雙向交流—直流電能轉換器之之時序圖。

圖 6 為雙向交流—直流電能轉換器期望之輸出波形。雙向交流—直流電能轉換器之調變信號為理想市電電壓之正弦波與振幅為  $\frac{V_{dc}}{2}$  且與市電電壓同步之準方波相減之輸出電壓，如圖 6(b) 所示，此理想的調變信號  $V_{inv}$  可表示為如式(1)所示：

$$V_{inv}(t) = \begin{cases} V_m \sin(\omega t) & , |V_{ac}(t)| < \frac{V_{dc}}{2} \\ V_m \sin(\omega t) - \frac{V_{dc}}{2} & , |V_{ac}(t)| \geq \frac{V_{dc}}{2} \end{cases} \quad (1)$$

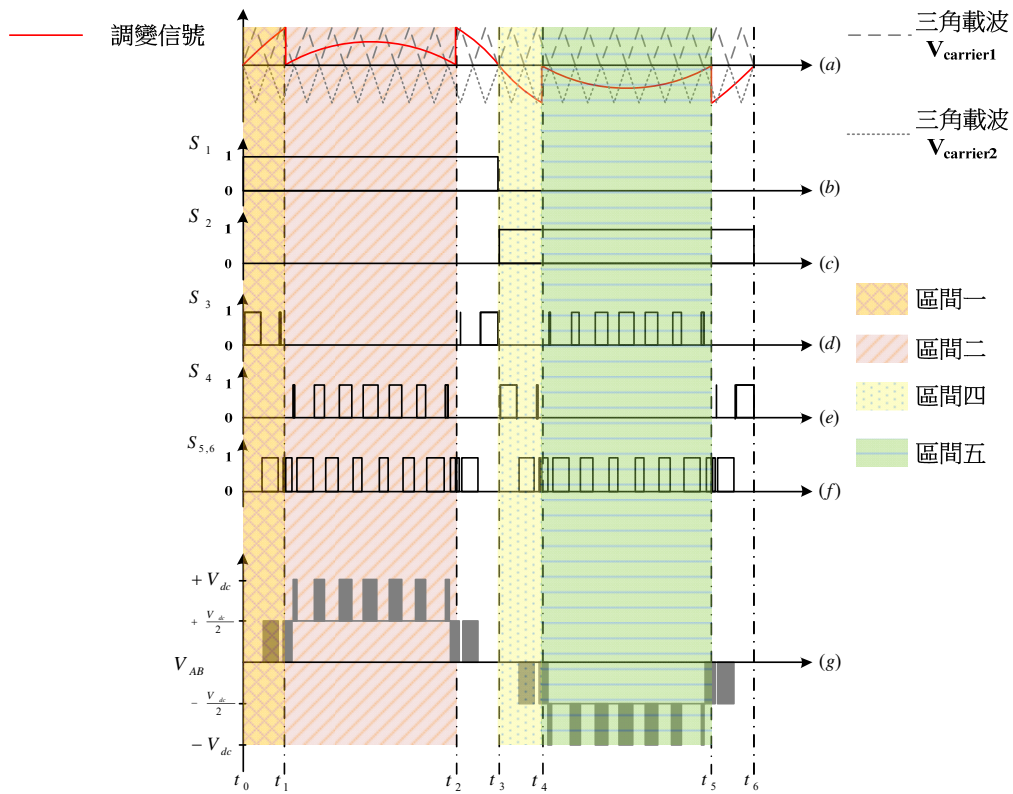


圖 5 雙向交流一直流電能轉換器之時序圖，(a)調變信號及三角載波  $V_{carrier1}$ 、 $V_{carrier2}$ ，(b)功率開關  $S_1$ ，(c) 功率開關  $S_2$ ，(d) 功率開關  $S_3$ ，(e) 功率開關  $S_4$ ，(f) 功率開關  $S_5$ 、 $S_6$ ，(g) 電感電壓  $V_{AB}$ 。

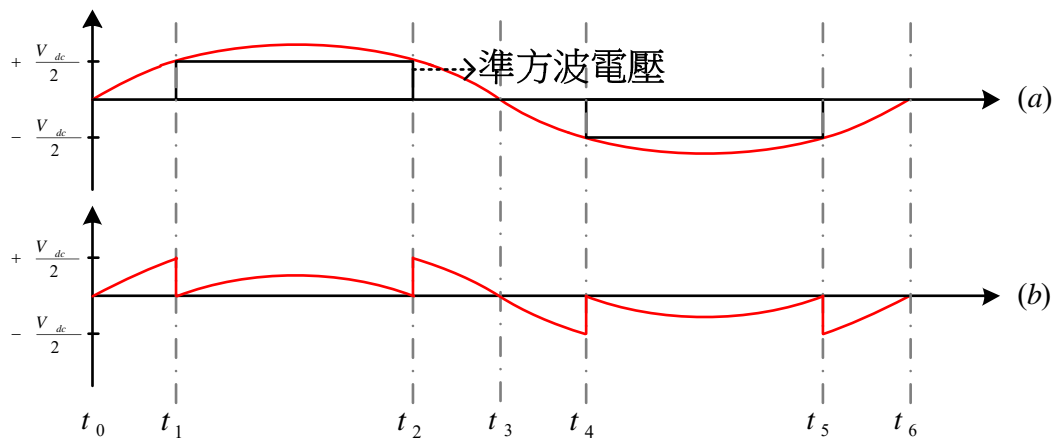


圖 6 雙向交流一直流電能轉換器期望之輸出波形，(a)市電電壓與準

方波電壓，(b) 調變信號。

本計畫之雙向交流—直流電能轉換器之工作區間可分為六種，於正負半週分別各有三種工作區間分別說明如下：

a. 區間一( $t_0-t_1$ )：

此區間雙向交流—直流電能轉換器將操作在圖 3(a)及圖 3(b)之模式一與模式二兩者間互相切換， $V_{AB}$ 之輸出電壓為  $0V$  與  $+\frac{V_{dc}}{2}$  間變換。

b. 區間二( $t_1-t_2$ )：

此區間雙向交流—直流電能轉換器將操作在圖 3(b)及圖 3(c)之模式二與模式三兩者間互相切換， $V_{AB}$ 之輸出電壓為  $+\frac{V_{dc}}{2}$  與  $V_{dc}$  間變換。

c. 區間三( $t_2-t_3$ )：

此區間雙向交流—直流電能轉換器動作原理與區間一相同， $V_{AB}$ 之輸出電壓為  $0V$  與  $+\frac{V_{dc}}{2}$  間變換。

d. 區間四( $t_3-t_4$ )：

此區間雙向交流—直流電能轉換器將操作在圖 3(c)及圖 3(d)之模式四與模式五兩者間互相切換， $V_{AB}$ 之輸出電壓為  $0V$  與  $-\frac{V_{dc}}{2}$  間變換。

e. 區間五( $t_4-t_5$ ):

此區間雙向交流—直流電能轉換器將操作在圖 3(d)及圖 3(f)之模式五與模式六兩者間互相切換， $V_{AB}$  之輸出電壓為 $-\frac{V_{dc}}{2}$ 與 $-V_{dc}$ 間變換。

f. 區間六( $t_5-t_6$ ):

此區間下雙向交流—直流電能轉換器動作原理與區間四相同， $V_{AB}$  之輸出電壓為  $0V$  與 $-\frac{V_{dc}}{2}$ 變換。

圖 7 為雙向交流—直流電能轉換器在併網時之控制方塊圖。虛線框內將市電電壓經電壓檢測器 III 檢出後由信號產生電路產生與市電電壓同步之弦波信號及振幅為 $\frac{V_{dc}}{2}$ 且與市電電壓同步之準方波，弦波信號與準方波信號相減得到期望之控制信號 $V_{inv}$ ；將  $C_1$  電壓  $V_{c1}$  和  $C_2$  電壓  $V_{c2}$  分別經電壓檢測器 I 和電壓檢測器 II 檢出並相加後與設定值相減，所產生的誤差訊號  $V_{err}$  經一比例積分器，其輸出結果再與孤島擾動信號相加(一般情況孤島擾動信號為 0)，最後與弦波信號相乘，得到市電電流之參考訊號；市電電流經電流檢測器檢出之訊號與市電電流參考信號相減得到一補償訊號，此訊號再與期望之控制信號 $V_{inv}$ 相加得到實際之調變訊號，再將調變訊號送至脈波寬度調變電路與三角載波比較後，經由驅動電路得到驅動訊號

並驅動功率開關（ $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ 、 $S_5$ 、 $S_6$ ）。

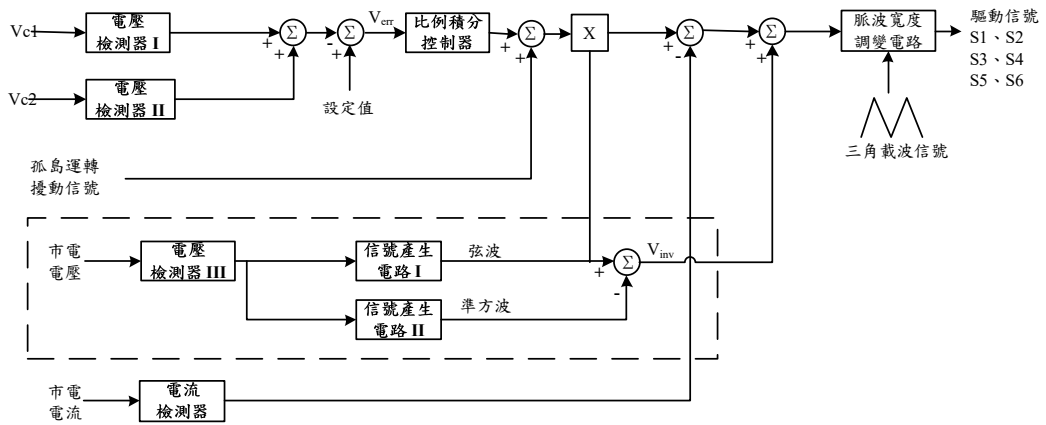


圖 7 併網型雙向交流—直流電能轉換器之控制方塊。

圖 8 為雙向直流—交流電能轉換器在獨立運轉時之控制方塊圖。虛線框內利用單晶片產生弦波信號及振幅為  $\frac{V_{dc}}{2}$  且與產生之弦波信號同步之準方波信號，弦波信號與準方波信號相減得到期望之控制信號  $V_{inv}$ ；將交流電壓  $V_{load}$  經電壓檢測器 I 與設定值相減所產生的誤差訊號  $V_{err}$  經一比例積分器，其輸出結果與單位振幅之弦波信號相乘，得到交流負載測電壓參考信號，此訊號再與期望之控制信號  $V_{inv}$  相加得到實際之調變訊號，再將調變訊號送至脈波寬度調變電路與三角載波比較後，經由驅動電路得到驅動訊號並驅動功率開關（ $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ 、 $S_5$ 、 $S_6$ ）。

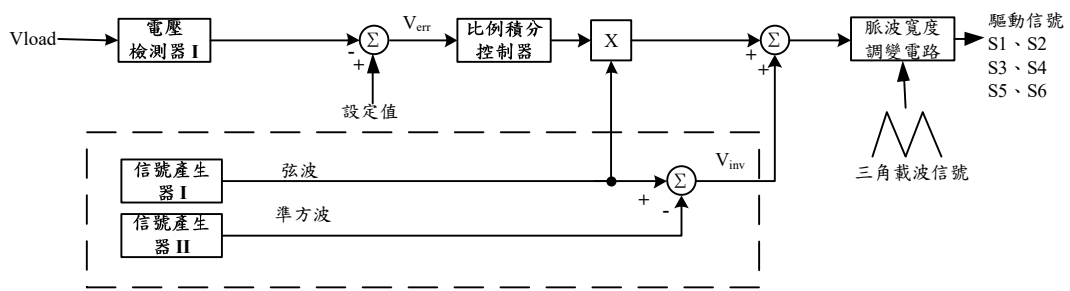


圖 8 獨立型直流－交流電能轉換器之控制方塊。

## (二)、升壓直流-直流電能轉換器

圖 9 為升壓直流-直流電能轉換器之電路架構圖[25]。因升壓轉換器之特性，其輸出端電壓高於輸入端電壓，當開關  $S_1$  導通時，等效電路如圖 9(b)所示，輸入端電容  $C_1$  與電感  $L_1$  形成導通迴路，使輸入電能儲存於電感  $L_1$  中，而此時快速二極體  $D_1$  呈反向偏壓，使輸出端電容  $C_2$  之電能不會反饋回輸入端，而負載  $R_1$  電能則由輸出電容  $C_2$  提供；當開關  $S_1$  截止時，等效電路如圖 9(c)所示，儲存於電感  $L_1$  中之電能與輸入端電容  $C_1$  之電能一同供給至輸出端電容  $C_2$  與負載  $R_1$ ，如此達到提昇輸出電壓之效果。如圖 9(d)為電感電流操作在連續導通之穩態電感電壓電流波形，根據伏特秒平衡一周期下的電感電壓平均值為 0，可得以下式(2):

$$V_{in}t_{on} + (V_{in} - V_{out})t_{off} = 0 \quad (2)$$

再整理可得式(3)

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{t_{off}}{T_s} = \frac{1}{1-D} \quad (3)$$

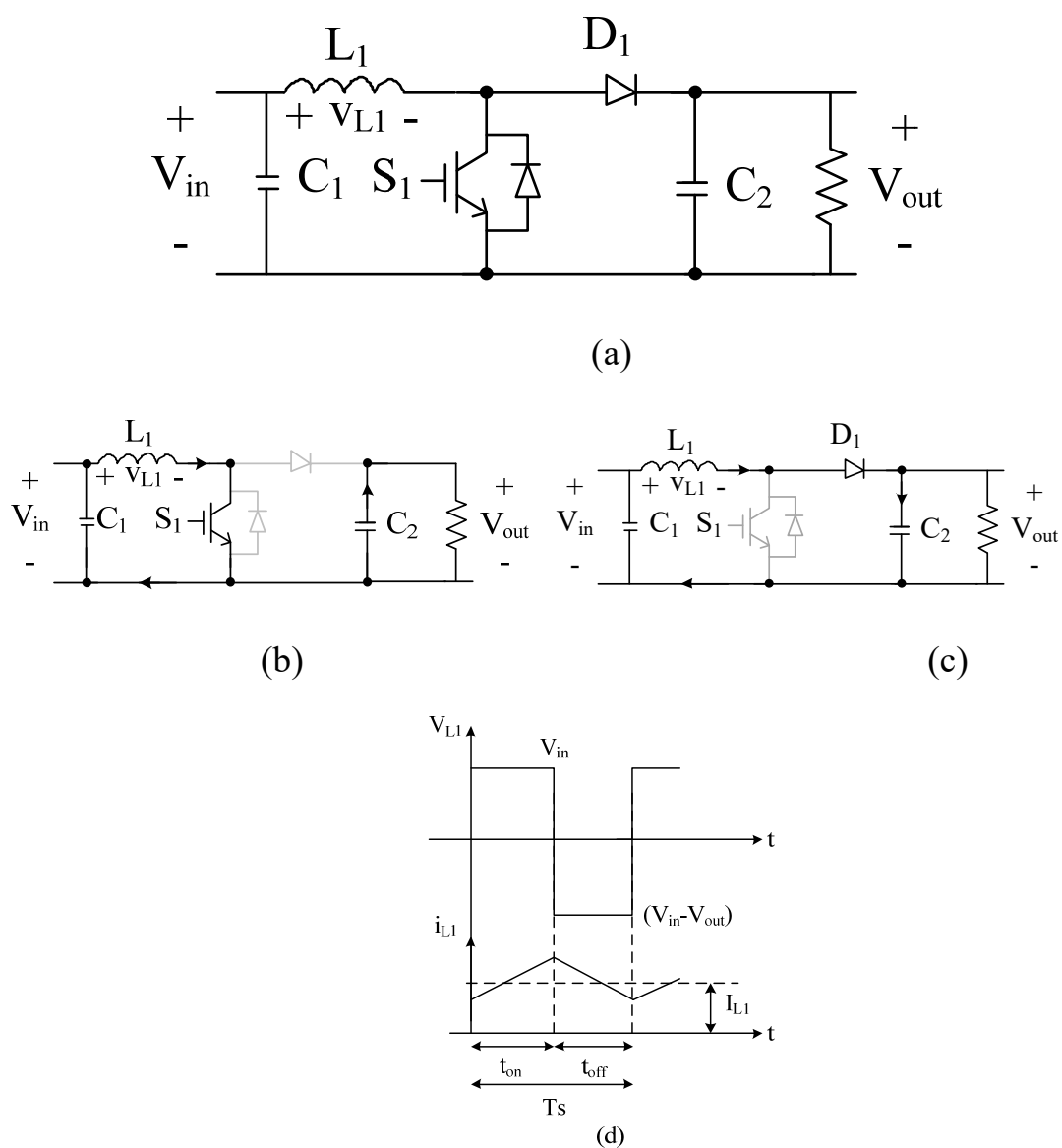


圖 9 升壓直流-直流電能轉換器，(a)電路架構，(b)開關  $S_1$  導通等效電路，(c)開關  $S_1$  截止等效電路，(d) 連續導通之穩態電感電壓電流波形。

圖 10 為升壓直流-直流電能轉換器之控制方塊。其中 MPPT 控制器使用責任週期法進行最大功率追蹤，市電併聯狀態時，直流-直流電能轉換器將再生能源端(風力與太陽能)電壓( $V_{wind}$  與  $V_{solar}$ )及電

流( $I_{wind}$  與  $I_{solar}$ )經檢測器取回送至 MPPT/限功率控制器用以計算再生能源功率，並決定責任週期擾動方向，最後 PWM 電路輸出經驅動電路來控制開關。獨立運轉狀態時，將電池電壓  $V_{bat}$  與直流匯流排電壓  $V_{bus\_DC}$  經檢測器送至 MPPT/限功率控制器，當直流匯流排電壓  $V_{bus\_DC}$  未到達保護電壓或電池充電設定電壓和電流限制值時，進行 MPPT 控制，當直流匯流排電壓  $V_{bus\_DC}$  到達保護電壓或電池充電設定電壓和電流限制值時，限功率模式開啟，圖 11 為限功率模式流程圖，避免直流匯流排電壓持續上升，最後 PWM 電路輸出經驅動電路來控制開關。

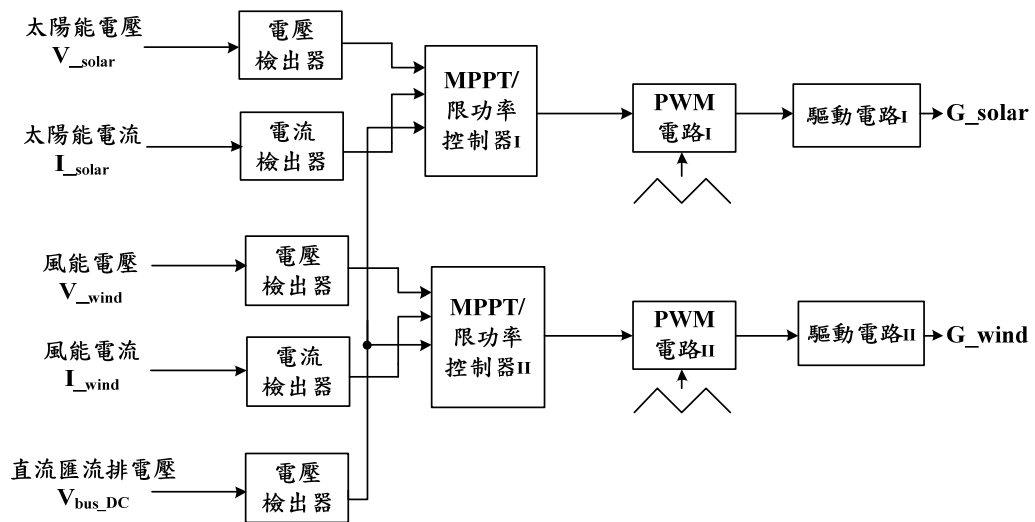


圖 10 直流-直流升壓式電能轉換器控制方塊圖。



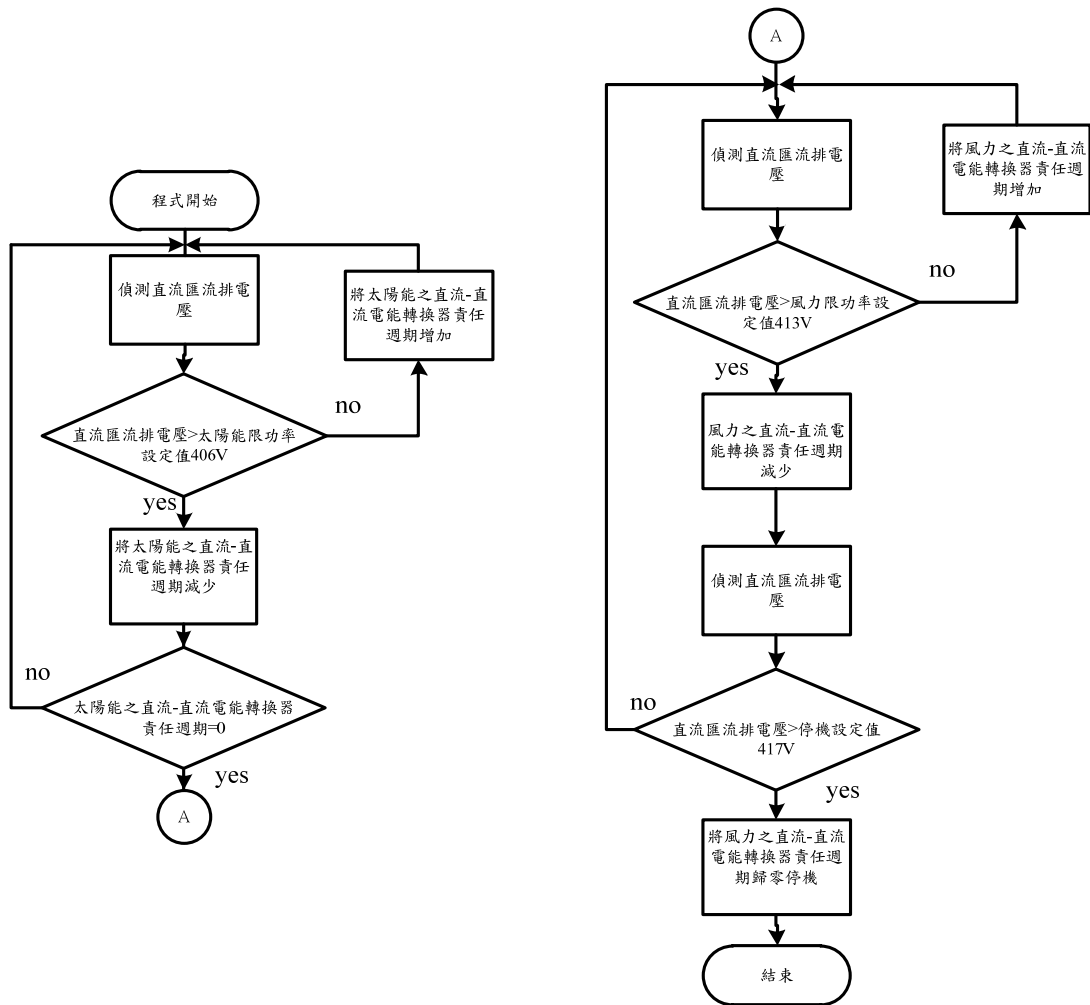


圖 11 限功率模式流程圖。

### (三)、雙向直流-直流電能轉換器

圖 12 為本文使用之雙向升降壓式直流-直流電能轉換器之電路架構[26]。其係由兩顆功率開關  $G_{bat\_1}$ 、 $G_{bat\_2}$ 、儲能電感  $L$ 、及輸入/輸出端穩壓電容  $C_{bat}$ 、 $C_{bat\_DC}$  組成。其可分別操作為降壓式直流-直流轉換器與升壓式直流-直流轉換器之兩種功能，以下針對上述兩種功能進行說明。

## 1. 升壓式

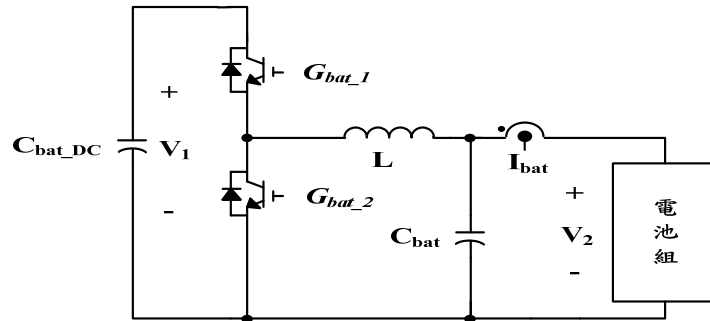


圖 12 雙向升降壓式直流-直流電能轉換器之電路架構。

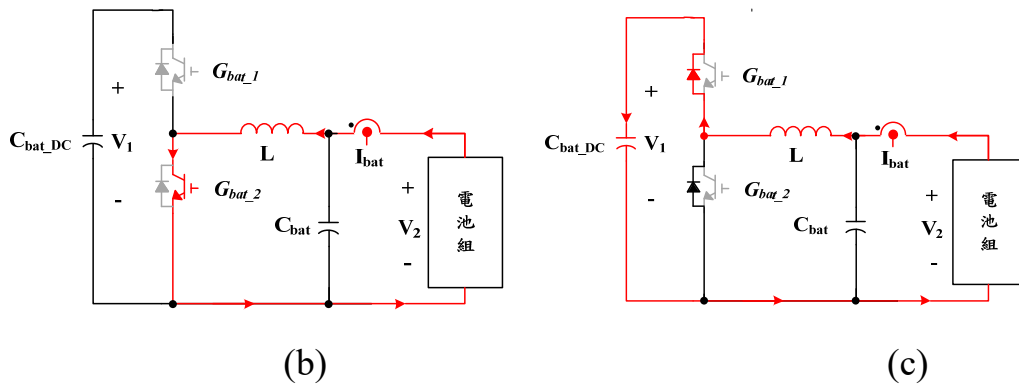


圖 13 雙向升降壓式直流-直流電能轉換器操作為升壓式轉換之等效電路，(a)開關  $G_{bat\_2}$  閉合，開關  $G_{bat\_1}$  截止，(b)開關  $G_{bat\_1}$ 、 $G_{bat\_2}$  截止。

當雙向直流-直流轉換器操作為升壓式直流-直流轉換器之功能時，升壓式電能轉換器開關導通與截止之電流路徑分別如圖 13(a)與(b)所示，在輸入電壓  $V_2$  高於輸出電壓  $V_1$  時，當開關  $G_{bat\_2}$  導通時，開關  $G_{bat\_1}$  截止，此時開關  $G_{bat\_1}$  不作用，由電源  $V_2$  流經電感

$L_{bat}$ 、開關  $G_{bat\_2}$  形成儲能迴路對電感  $L$  儲能；當開關  $G_{bat\_2}$  及  $G_{bat\_1}$  截止，電源  $V_2$  經由電感  $L$ 、開關  $G_{bat\_1}$  之二極體，提供能量給電容  $C_{bat\_DC}$ 。

電感電流連續導通下

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{1}{1-D} \quad (4)$$

$D$  為責任週

期。

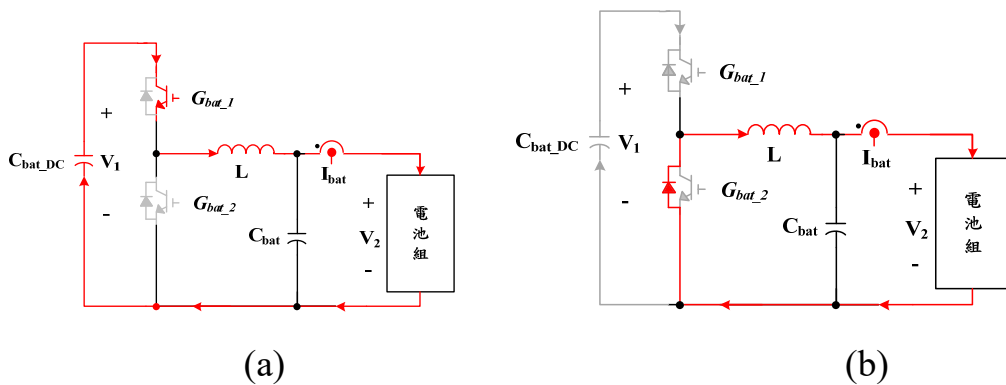


圖 14 雙向升降壓式直流-直流電能轉換器操作為降壓式轉換之等效電路，(a)開關  $G_{bat\_2}$  閉合，開關  $G_{bat\_1}$  截止，(b)開關  $G_{bat\_1}$ 、 $G_{bat\_2}$  截止。

雙向升降壓式直流-直流轉換器操作為降壓式直流-直流轉換器之功能時，開關導通與截止之電流路徑如圖 14(a)、(b)所示，輸出電壓  $V_2$  低於輸入電壓  $V_1$ ，當開關  $G_{bat\_1}$  導通時，開關  $S_{bat\_2}$  截止，

此時開關  $G_{bat\_2}$  不作用，輸入電壓  $V_1$  流經電感  $L_1$  對電容  $C_{bat2}$  釋能，此時電感  $L$  為儲能狀態，電容  $C_{bat2}$  提供電池組所需電能；當開關  $G_{bat\_1}$  及  $G_{bat\_2}$  截止時，電感  $L$  經由開關  $G_{bat\_2}$  之二極體形成釋能迴路，儲存於電感  $L$  上的能量經開關  $G_{bat\_2}$  之二極體釋能給電容  $C_{bat2}$ ，使電容  $C_{bat2}$  對電池組持續提供能量。電感電流連續導通下

$$\frac{V_2}{V_1} = D$$

(5)

圖 15 為雙向直流-直流電能轉換器之控制方塊圖。市電正常時，雙向直流-直流電能轉換器可以以降壓方式對電池組作定電流(CC)/定電壓(CV)充電或以升壓方式將電池組作定功率(CP)放電。

由圖 15 紅色虛線框可看出電池電壓期望值與經檢測器取回之電池電壓  $V_{bat}$  相減，之後進入 PI 控制器 I 進行運算，得到其限制值為電流期望值與經檢測器取回之電池電流  $I_{bat}$  相減，之後進入 PI 控制器 II 進行運算，將運算結果傳至充電/放電/穩壓模式選擇器，最後送至 PWM 控制電路並經驅動電路來控制開關  $G_{bat\_1}$ 。由圖 15 藍色虛線框可看出電池放電定功率期望值與經檢測器取回電池電壓  $V_{bat}$  相除，可得到電池放電之電流期望值與經檢測器取回電池電流  $I_{bat}$  相減，相減結果進入 PI 控制器 III 進行運算，將運算結果傳至充電/放電/穩壓模式選擇器，最後送至 PWM 控制電路並經驅

動電路來控制開關  $G_{bat\_2}$ 。

當市電斷開時，電池組經雙向直流-直流電能轉換器進行直流匯流排穩壓控制，如圖 15 綠色虛線框可看出直流匯流排電壓期望值與經檢測器取回直流匯流排電壓  $V_{bus\_DC}$  相減，相減結果進入 PI 控制器 IV 進行運算將運算結果傳至充電/放電/穩壓模式選擇器，最後送至 PWM 控制電路並經驅動電路來控制開關  $G_{bat\_2}$ 。

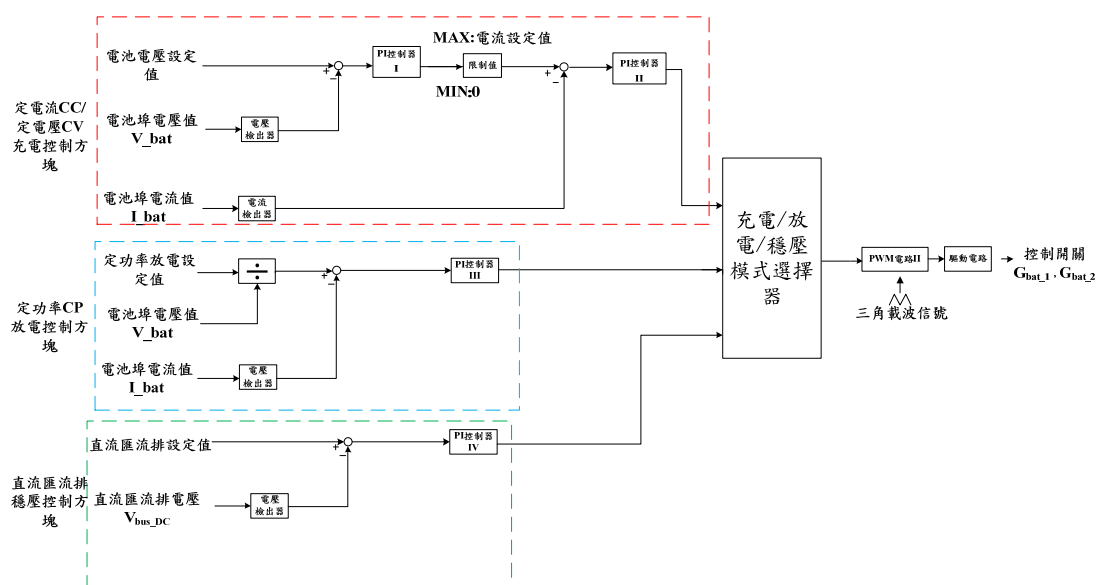


圖 15 雙向直流-直流電能轉換器之控制方塊圖。

## 參、模擬結果

### (一)、具電池儲能之併網型風力發電電能轉換介面

當市電正常時，具電池儲能之併網型風力發電電能轉換介面經由線路開關與市電併聯運轉，在此情況下，具電池儲能之併網型風力發電電能轉換介面依據電池組之充/放電狀態，可區分為五種工

作模式，如圖 16 至圖 20。在電池組充電時有三種工作模式分別為模式一、模式二及模式三，在電池組放電時有兩種工作模式分別為模式四及模式五。當市電正常時連接小型風力之電能轉換器隨時執行 MPPT 功能；而電池之定電流充電電流為 15A(100AH 電池之 0.15C)，而定電壓充電之電壓為 270V(13.5V/顆\*20 顆)，而電池之定功率放電功率 1KW。

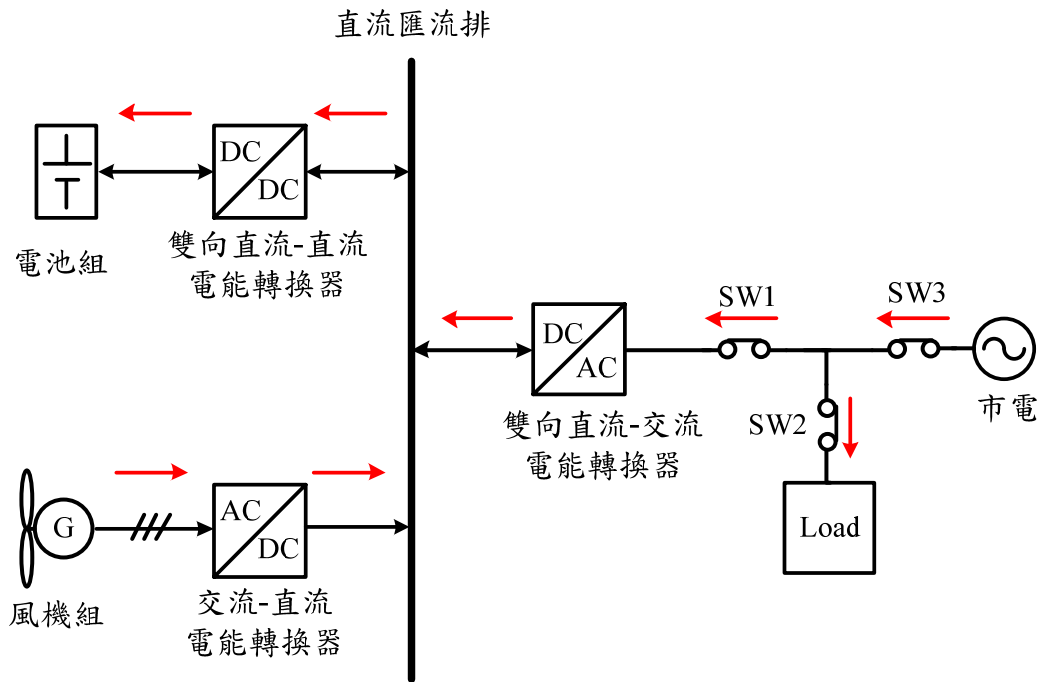


圖 16 具電池儲能之併網型風力發電電能轉換介面模式一

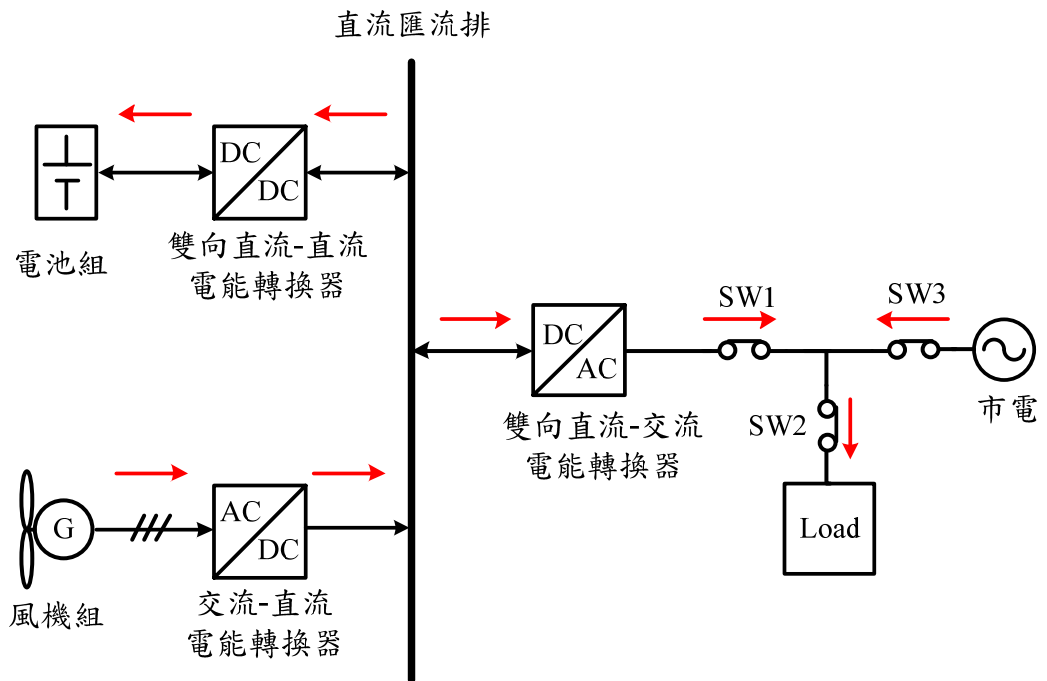


圖 17 具電池儲能之併網型風力發電電能轉換介面模式二

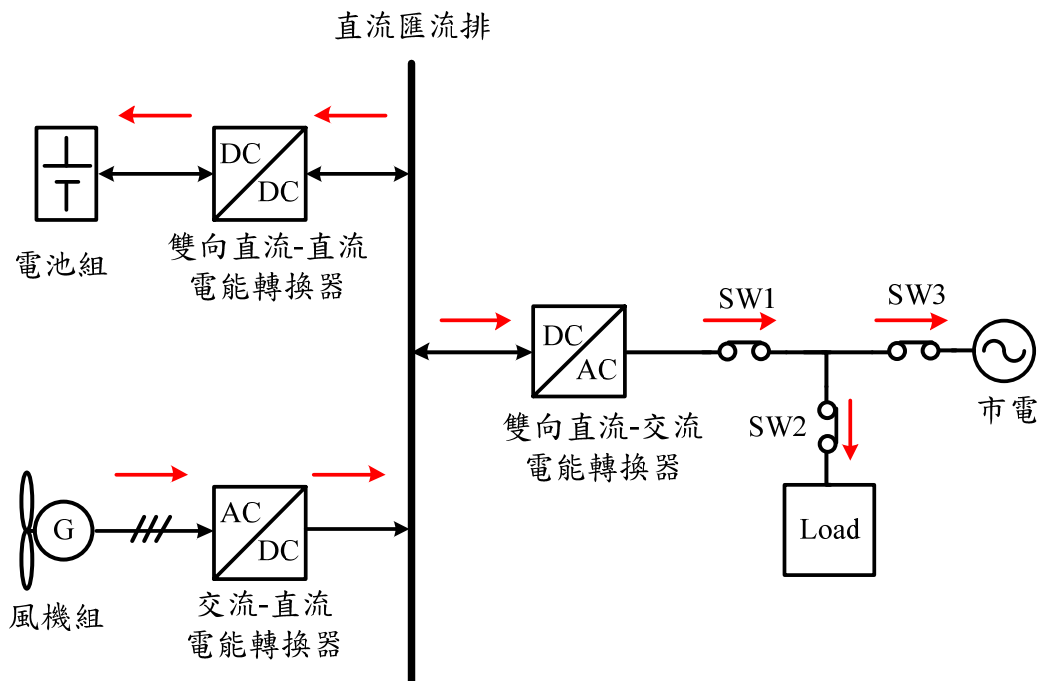


圖 18 具電池儲能之併網型風力發電電能轉換介面模式三

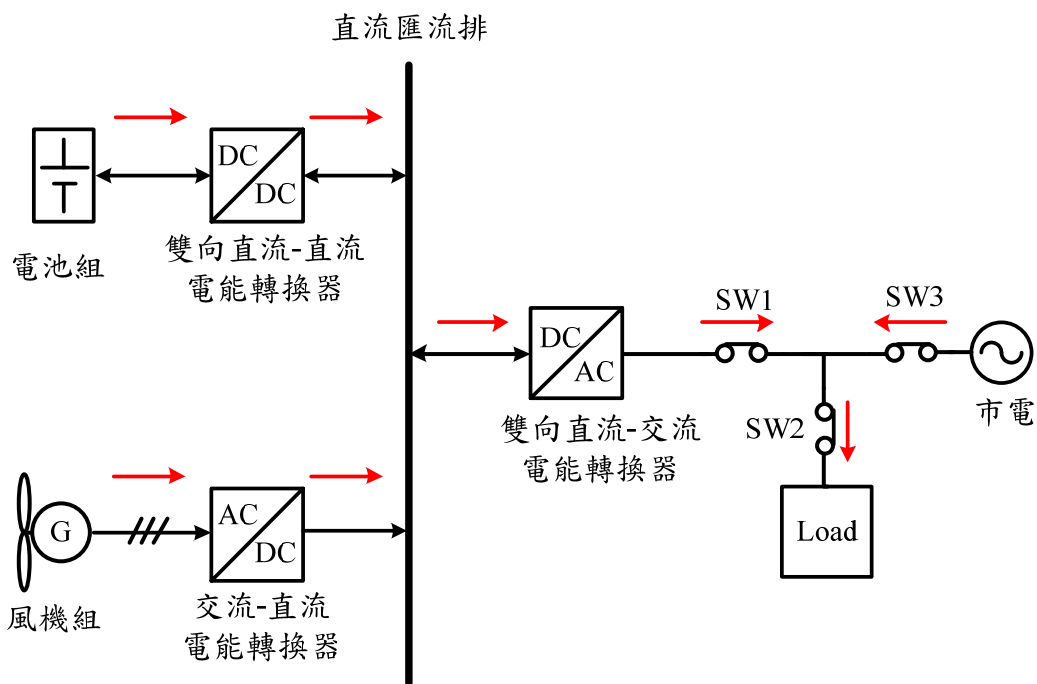


圖 19 具電池儲能之併網型風力發電電能轉換介面模式四

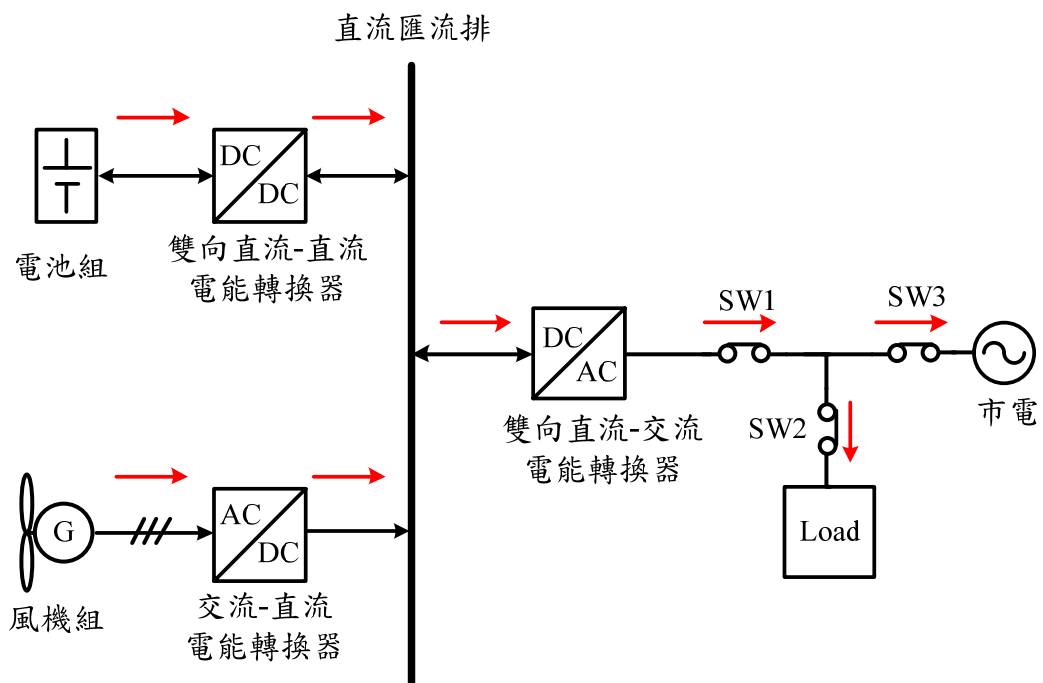


圖 20 具電池儲能之併網型風力發電電能轉換介面模式五



## 1、模式一: $P_{wind} < P_{bat}$

當電池尚未充飽電狀態下，風力發電產生之電能優先對電池充電，而不注入市電或提供給負載，因此其功率潮流如圖 16 所示。假設此時負載為 2KW，風力發電機之最大輸出功率為 1KW。

圖 21 為模式一下具電池儲能之併網型風力發電電能轉換介面穩態之模擬結果。圖 21 (a)  $V_{in}$  為市電端電壓、圖 21(b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 21 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 21 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 21 (e)  $i_{Rwind\_AC}$  為風力端 R 相電流、圖 21(f)  $i_{bat}$  為電池端電流、圖 21 (g)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 21 (h)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出 2.7 秒~3.47 秒前的穩態波形，此時電池進行 CC 充電。由圖中可看出市電電流供電給負載電流，同時與風力共同以 15A 之定電流對電池充電，而於 3.47 秒時達到電池之轉態電壓 270V，此時開始轉為以 270V 進行定電壓充電，於 3.47 秒由定電流轉變成定電壓充電時，電池所需充電電流減少，功率潮流方向可由市電電壓與電流之相位關係來判別，同相位表示由市電饋入功率；反之表示為輸出功率給市電。

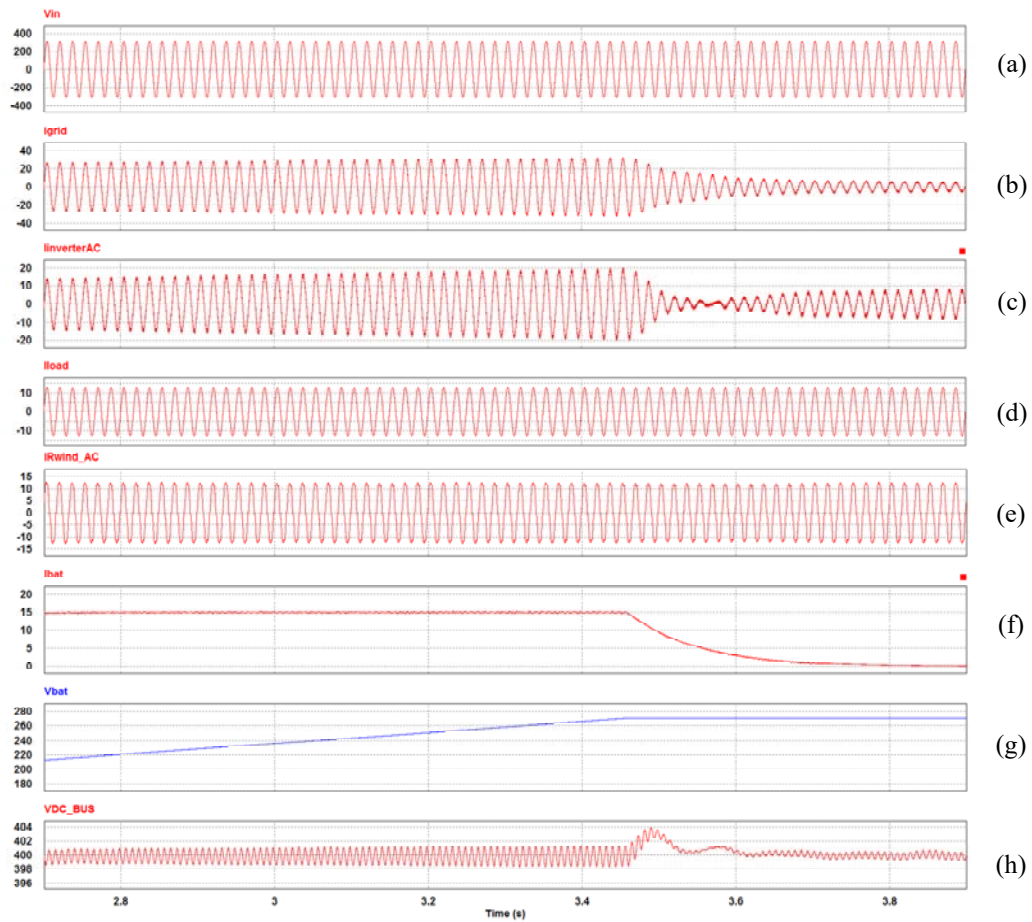


圖 21 模式一下具電池儲能之併網型風力發電電能轉換介面穩態之模擬結果，(a) $V_{in}$ ，(b) $i_{grid}$ ，(c) $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{Rwind\_AC}$ ，(f) $i_{bat}$ ，(g) $V_{bat}$ ，(h) $V_{dc\_bus}$ 。

圖 22 為模式一下具電池儲能之併網型風力發電電能轉換介面暫態之模擬結果。圖 22 (a)  $V_{in}$  為市電端電壓、圖 22 (b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 22(c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 22 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 22(e)  $i_{Rwind\_AC}$  為風力端 R 相電流、

圖 22(f)  $i_{bat}$  為電池端電流、圖 22 (g)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 22 (h)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出在 3.47 秒電池充電至額定電壓 270V 由定電流充電轉為定電壓充電，定電壓充電所需之電池充電電流減少，於市電端供給電池充電之電流亦隨之減少，最後風力發電除了提供電池充電電流，並將風力發電多餘之電力饋入併網之雙向直流-交流電能轉換器交流端，最後其功率潮流由負載大小決定為模式二或模式三。

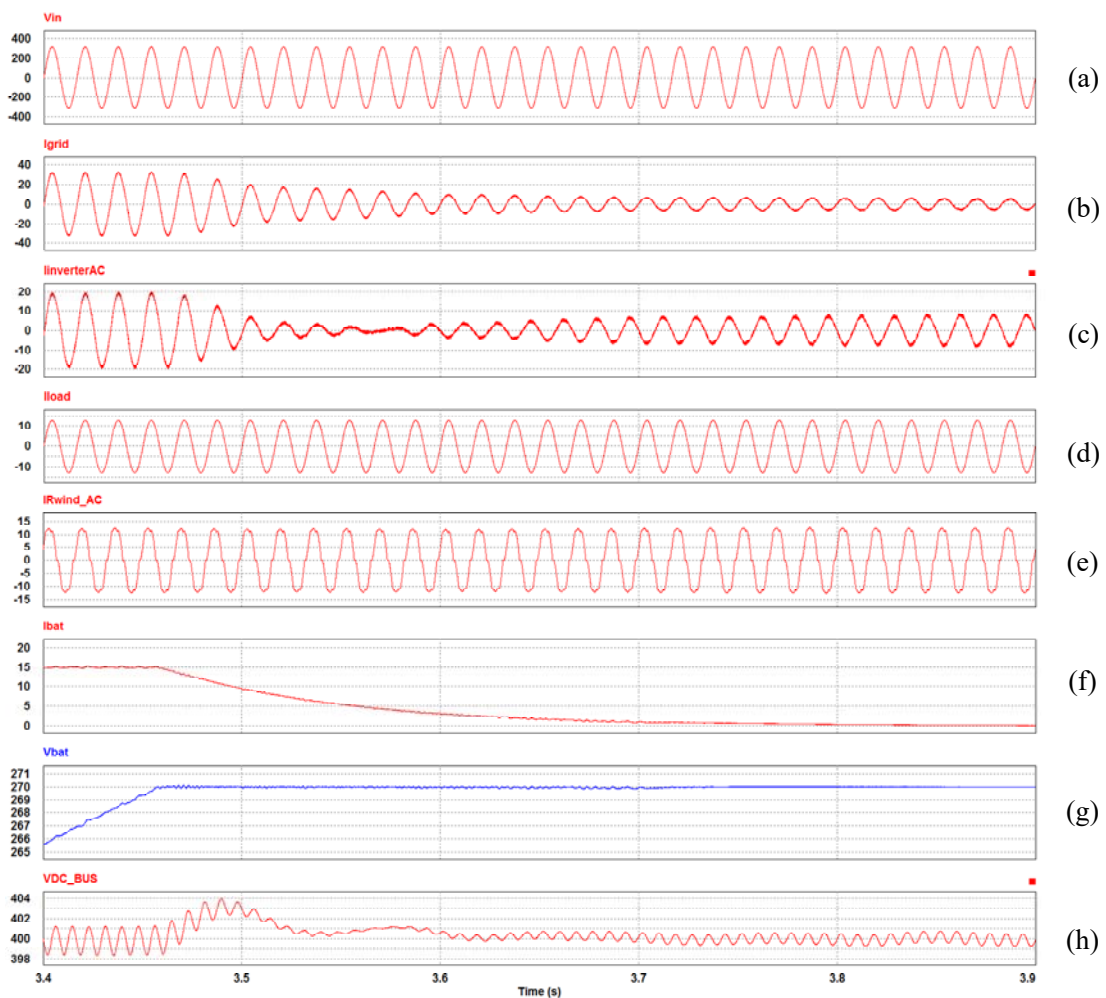


圖 22 模式一下具電池儲能之併網型風力發電電能轉換介面暫態之模擬結果，(a) $V_{in}$ ，(b) $i_{grid}$ ，(c) $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{Rwind\_AC}$ ，(f) $i_{bat}$ ，(g) $V_{bat}$ ，(h) $V_{dc\_bus}$ 。

## 2、模式二 $P_{bat}+P_{load}>P_{wind}>P_{bat}$ (假設電池充飽電)

當風力發電產生之功率  $P_{wind}$  大於電池充電所需之功率  $P_{bat}$  但小於負載消耗之功率  $P_{load}$  與電池充電所需之功率  $P_{bat}$  之和時 ( $P_{bat}+P_{load}$ )，其功率潮流如圖 17 所示。假設此時交流負載為 2KW，風力發電機之最大輸出功率為 1KW，電池充飽電。

圖 23 模式一下具電池儲能之併網型風力發電電能轉換介面之暫態電壓與電流之模擬結果。圖 23 (a)  $V_{in}$  為市電端電壓、圖 23 (b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 23 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 23 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 23 (e)  $i_{Rwind\_AC}$  為風力端 R 相電流、圖 23 (f)  $i_{bat}$  為電池端電流、圖 23 (g)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 23 (h)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出 1 秒前風力發電機未啟動，負載電流由市電電流提供；風力發電機於 1 秒開始啟動並開始進行 MPPT，此時直流匯流排電壓會有暫態電壓，而併網之雙向直流-交流電能轉換器輸入交流端電流逐步增加，市電電流逐漸減少，最後風力發電與市電電流共同供給負載電流，並達到

平衡。

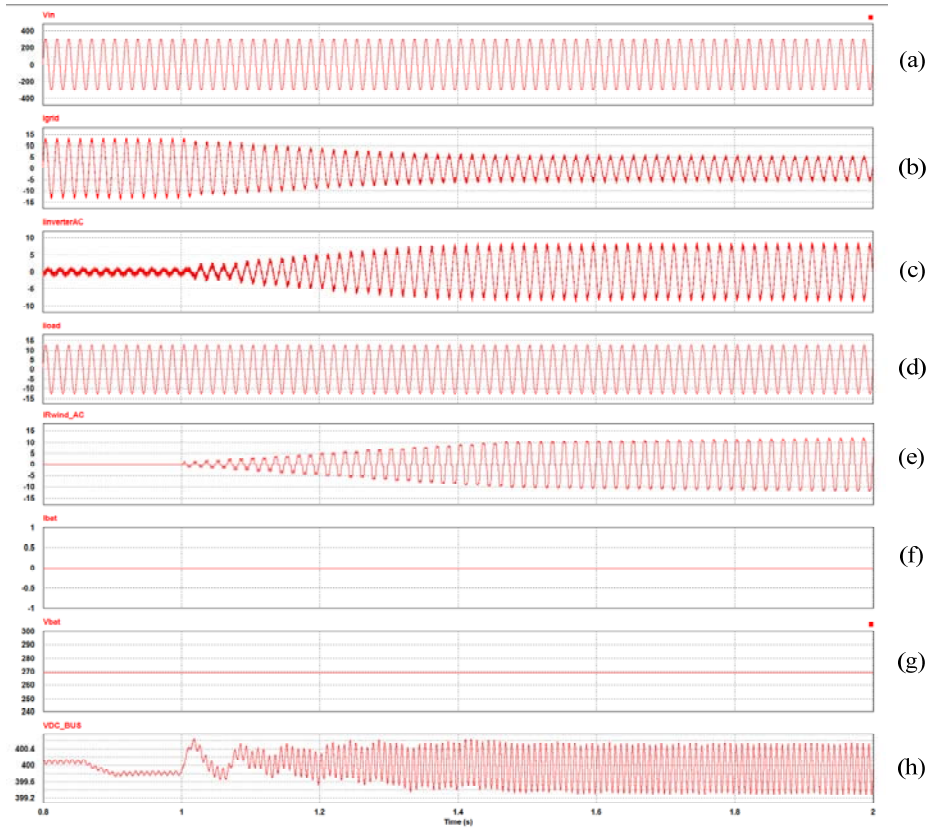


圖 23 模式二下具電池儲能之併網型風力發電電能轉換介面暫態之模擬結果，(a) $V_{in}$ ，(b) $i_{grid}$ ，(c) $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{Rwind\_AC}$ ，(f) $i_{bat}$ ，(g) $V_{bat}$ ，(h) $V_{dc\_bus}$ 。

圖 24 為模式二下具電池儲能之併網型風力發電電能轉換介面之穩態電壓與電流之模擬結果。圖 24 (a)  $V_{in}$  為市電端電壓、圖 24 (b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 24 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 24 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 24 (e)  $i_{Rwind\_AC}$  為風力端 R 相電流、圖 24 (f)  $i_{bat}$  為電池端電流、圖 24 (g)  $V_{bat}$  為電池端電壓、

圖 24 (h)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出 2 秒後之穩態波形其負載所需之電流係由市電與風能所提供，功率潮流方向可由市電電壓與電流之相位關係來判別，此時由市電供給電力，其功率潮流為模式二。

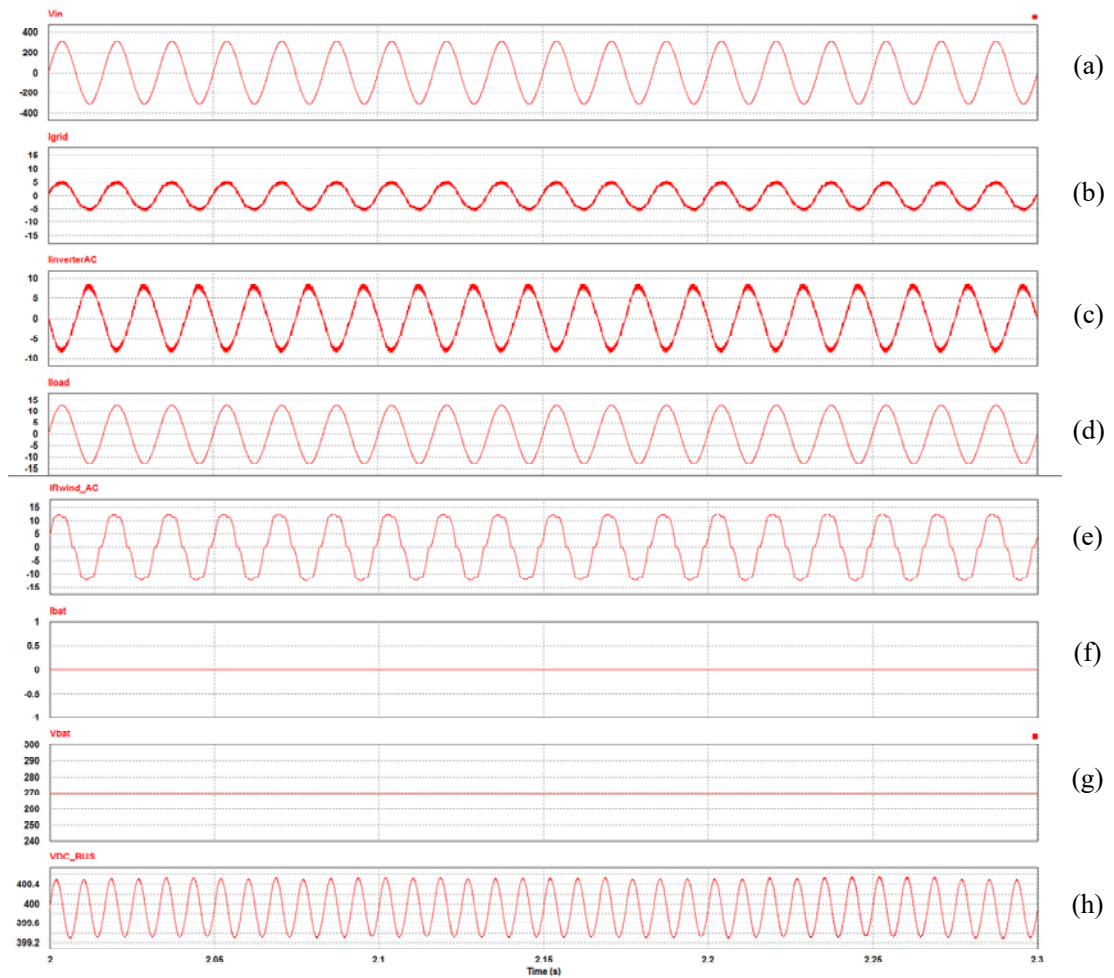


圖 24 模式二下具電池儲能之併網型風力發電電能轉換介面穩態之模擬結果，(a) $V_{in}$ ，(b) $i_{grid}$ ，(c) $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{Rwind\_AC}$ ，(f) $i_{bat}$ ，(g) $V_{bat}$ ，(h) $V_{dc\_bus}$ 。

### 3、模式三 $P_{bat}+P_{load}<P_{wind}$ (假設電池充飽電)

當風力發電產生之功率  $P_{wind}$  大於負載消耗之功率  $P_{load}$  與電池充電所需之功率  $P_{bat}$  時( $P_{bat}+P_{load}$ )，其功率潮流如圖 18 所示。假設交流負載為 600W，風力發電機之最大輸出功率為 1KW，電池充飽電。

圖 25 模式三下具電池儲能之併網型風力發電電能轉換介面之暫態電壓與電流之模擬結果。圖 25 (a)  $V_{in}$  為市電端電壓、圖 25 (b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 25 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 25 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 25(e)  $i_{Rwind\_AC}$  為風力端 R 相電流、圖 25 (f)  $i_{bat}$  為電池端電流、圖 25 (g)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 25(h)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出 1 秒前風力發電機未啟動，負載電流由市電電流提供；風力發電機於 1 秒開始啟動，並開始進行 MPPT，使併網之雙向直流-交流電能轉換器輸入交流端電流逐步增加，而市電電流則逐步減少，最後部份功率由併網之雙向直流-交流電能轉換器注入市電，並達到平衡。

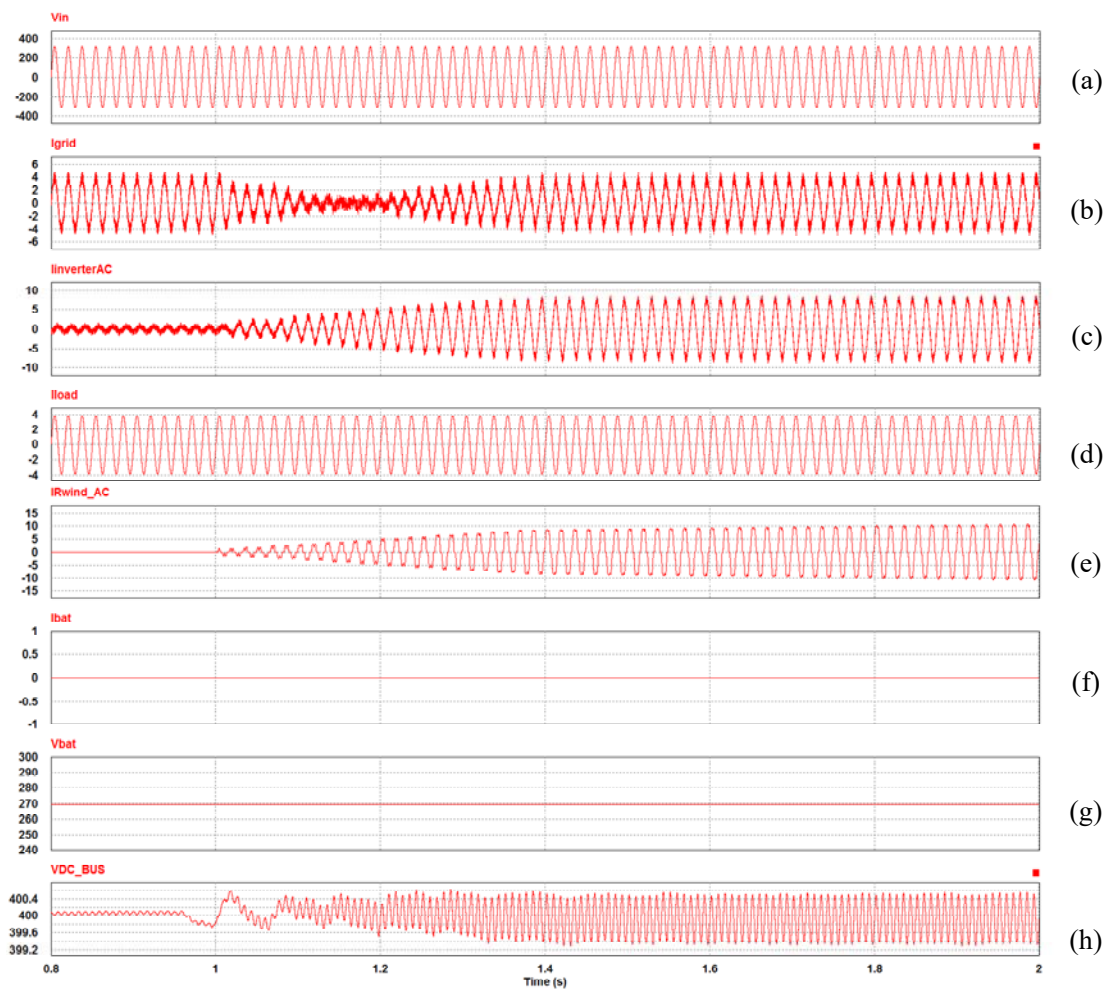


圖 25 模式三下具電池儲能之併網型風力發電電能轉換介面暫態之模擬結果，(a) $V_{in}$ ，(b) $i_{grid}$ ，(c) $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{Rwind\_AC}$ ，(f) $i_{bat}$ ，(g) $V_{bat}$ ，(h) $V_{dc\_bus}$ 。

圖 26 模式三下具電池儲能之併網型風力發電電能轉換介面之穩態電壓與電流之模擬結果。圖 26 (a)  $V_{in}$  為市電端電壓、圖 26 (b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 26 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器



交流電流、圖 26 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 26(e)  $i_{Rwind\_AC}$  為風力端 R 相電流、圖 26 (f)  $i_{bat}$  為電池端電流、圖 26 (g)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 26(h)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出 2 秒後之穩態時電流相位可看出功率潮流方向為饋入市電，此時功率潮流為模式三。

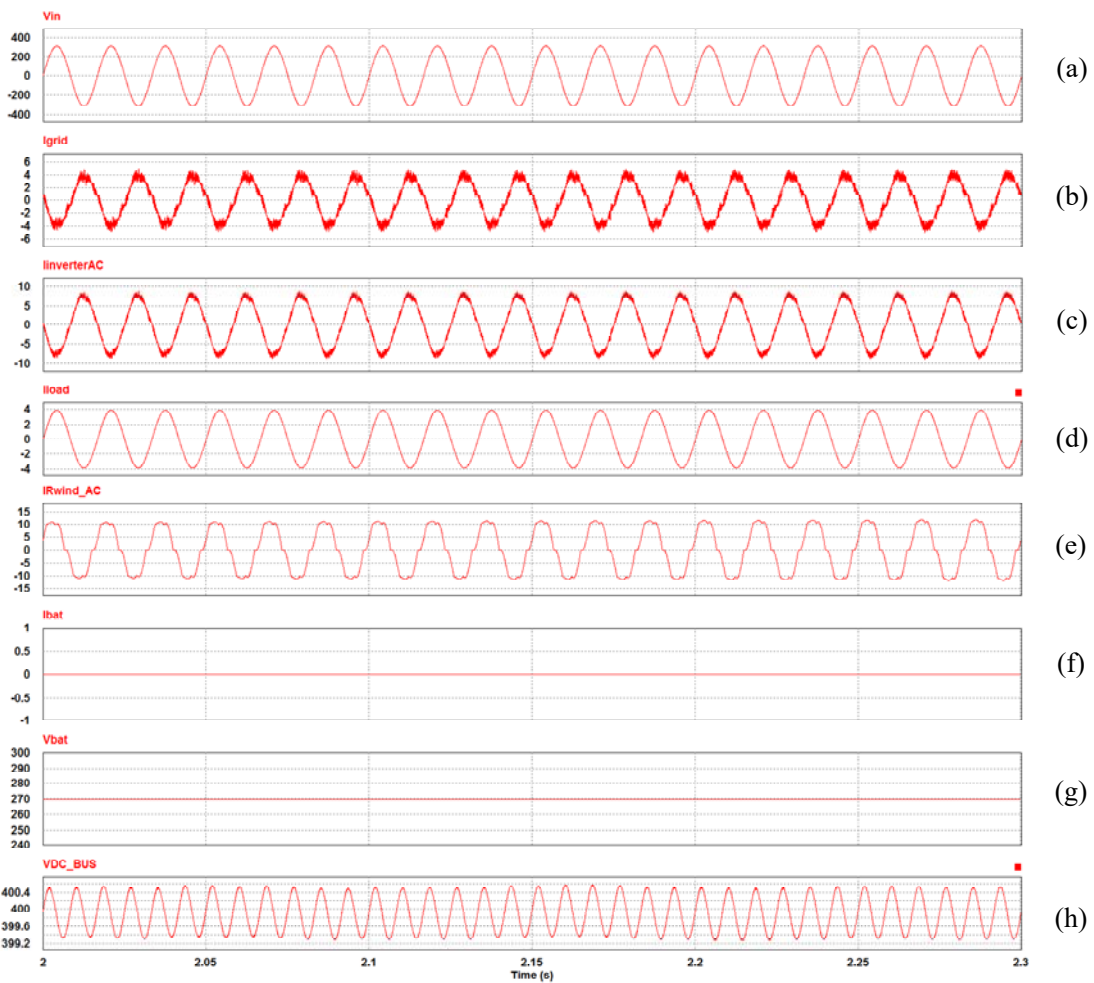


圖 26 模式三下具電池儲能之併網型風力發電電能轉換介面穩態之模擬結果，(a) $V_{in}$ ，(b) $i_{grid}$ ，(c) $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{Rwind\_AC}$ ，(f) $i_{bat}$ ，(g) $V_{bat}$ ，(h) $V_{dc\_bus}$ 。

#### 4、模式四 $P_{load} > P_{wind} + P_{bat}$

當負載消耗之功率  $P_{load}$  大於風力發電產生之功率  $P_{wind}$  與電池放充電產生之功率  $P_{bat}$  之和時( $P_{wind} + P_{bat}$ )，其功率潮流如圖 19 所示。假設交流負載為 3KW，風力發電機之最大輸出功率為 1KW，電池輸出功率 1KW。

圖 27 為模式四下具電池儲能之併網型風力發電電能轉換介面之模擬結果。圖 27 (a)  $V_{in}$  為市電端電壓、圖 27 (b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 27 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 27 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 27 (e)  $i_{Rwind\_AC}$  為風力端 R 相電流、圖 27 (f)  $P_{bat}$  為電池端功率、圖 27 (g)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 27 (h)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。模擬結果可看出 3.6 秒~4.2 秒間的波形，由圖中可看出在電池以定功率 1KW 放電，電池與風力發電經由併網之雙向直流-交流電能轉換器輸入電力至交流端，並結合市電電力供給負載電力，於約 3.99 秒，由於電池電壓放電至為防止過放之保護電壓，所以電池停止定功率放電，此時由於電池停止輸出電力，僅風力發電經由併網之雙向直流-交流電能轉換器輸入電力至交流端，因市電供給負載之電力將增加。

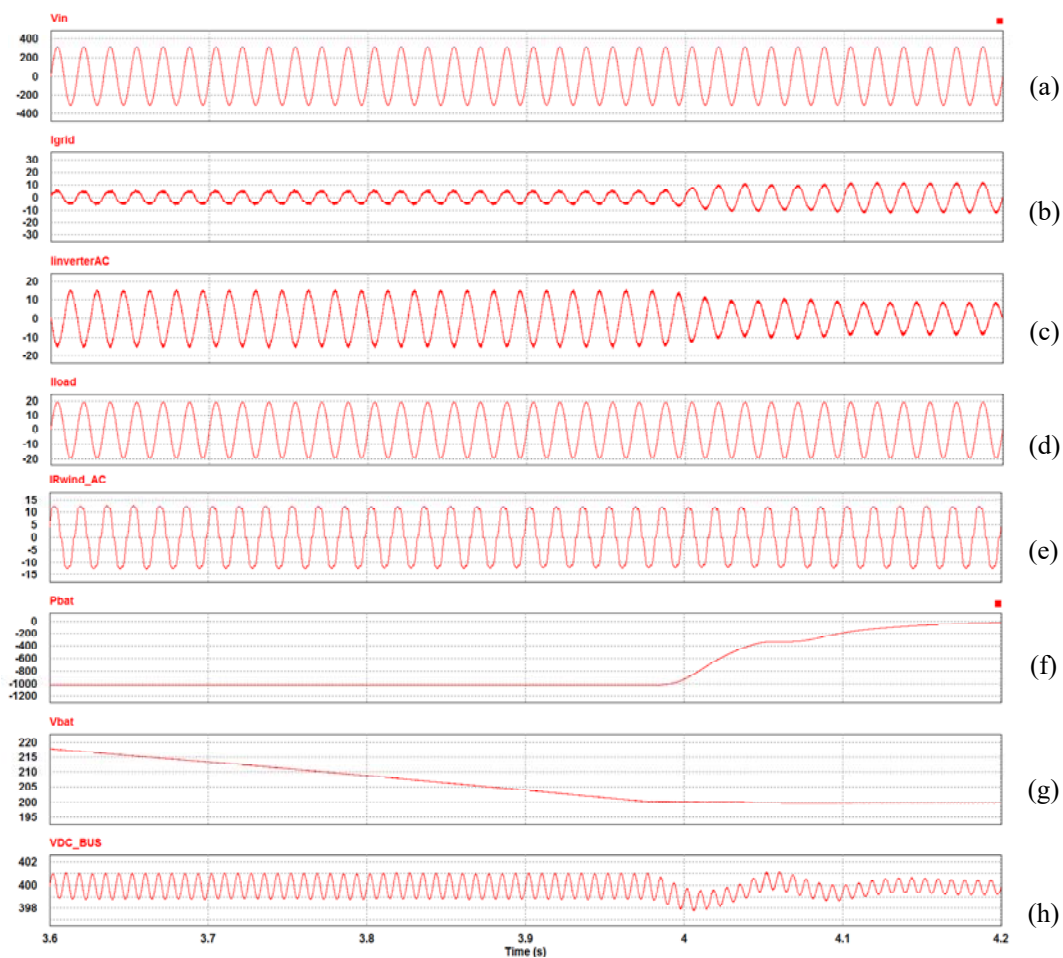


圖 27 模式四下具電池儲能之併網型風力發電電能轉換介面之模擬結果，(a) $V_{in}$ ，(b) $i_{grid}$ ，(c) $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{wind\_AC}$ ，(f) $P_{bat}$ ，(g) $V_{bat}$ ，(h) $V_{dc\_bus}$ 。

### 5、模式五 $P_{load} < P_{wind} + P_{bat}$

當風力發電產生之功率  $P_{wind}$  與電池放充電產生之功率  $P_{bat}$  之和  $(P_{wind} + P_{bat})$  大於負載消耗功率  $P_{load}$  時，多餘的功率會饋入市電端，其功率潮流如圖 20 所示。假設交流負載為 1KW，風力發電機之最大輸出功率為 1KW，電池輸出功率 1KW。

圖 28 為模式五下具電池儲能之併網型風力發電電能轉換介面之模擬結果。圖 28 (a)  $V_{in}$  為市電端電壓、圖 28 (b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 28 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 28 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 28(e)  $i_{Rwind\_AC}$  為風力端 R 相電流、圖 28 (f)  $P_{bat}$  為電池端功率、圖 28 (g)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 28(h)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。模擬結果可看出 3.6 秒~4.2 秒間的波形，由由模擬結果可看出在電池以定功率 1KW 放電，電池與風力發電經由併網之雙向直流-交流電能轉換器輸入電力至交流端，除了供給負載電力之外將多餘電力回饋市電端，於約 3.99 秒時，由於電池電壓放電至防止過放之保護電壓，所以電池停止定功率放電，此時由於電池停止輸出電力，僅風力發電經由併網之雙向直流-交流電能轉換器輸入電力至交流端，因而饋入市電之電流減少。

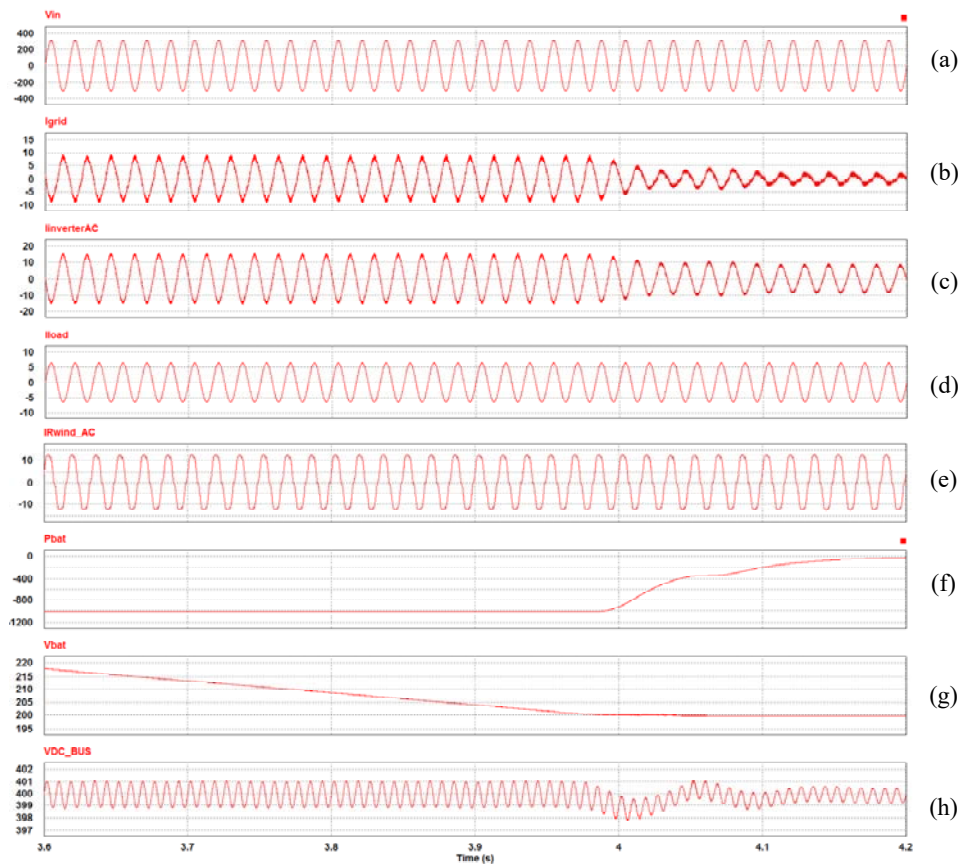


圖 28 模式五下具電池儲能之併網型風力發電電能轉換介面之模擬結果，(a) $V_{in}$ ，(b) $i_{grid}$ ，(c) $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{wind\_AC}$ ，(f) $P_{bat}$ ，(g) $V_{bat}$ ，(h) $V_{dc\_bus}$ 。

## (二)、具電池儲能之獨立型風力發電電能轉換介面

當市電斷電時，具電池儲能之併網型風力發電電能轉換介面經由線路開關打開使系統切離市電，在此情況下，具電池儲能之獨立型風力發電電能轉換介面形成一不斷電電源供應器介面，依據電池組之充/放電狀態，可區分為三種工作模式，如圖 29 至圖 31，在

電池組充電時有兩種工作模式為模式六及模式七，在電池組放電時有一種工作模式為模式八。當獨立運轉時根據交流端負載大小決定電池充放電與風力是否放棄 MPPT；而電池之充電電力為風力發電給負載消耗完之剩餘電力。

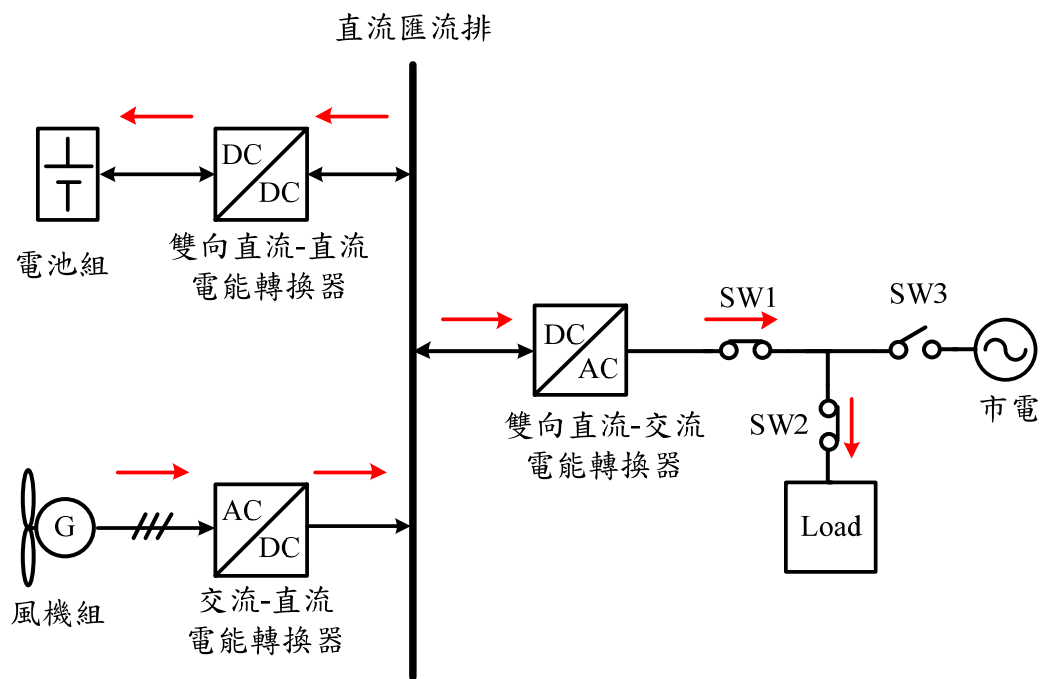


圖 29 具電池儲能之獨立型風力發電電能轉換介面模式六

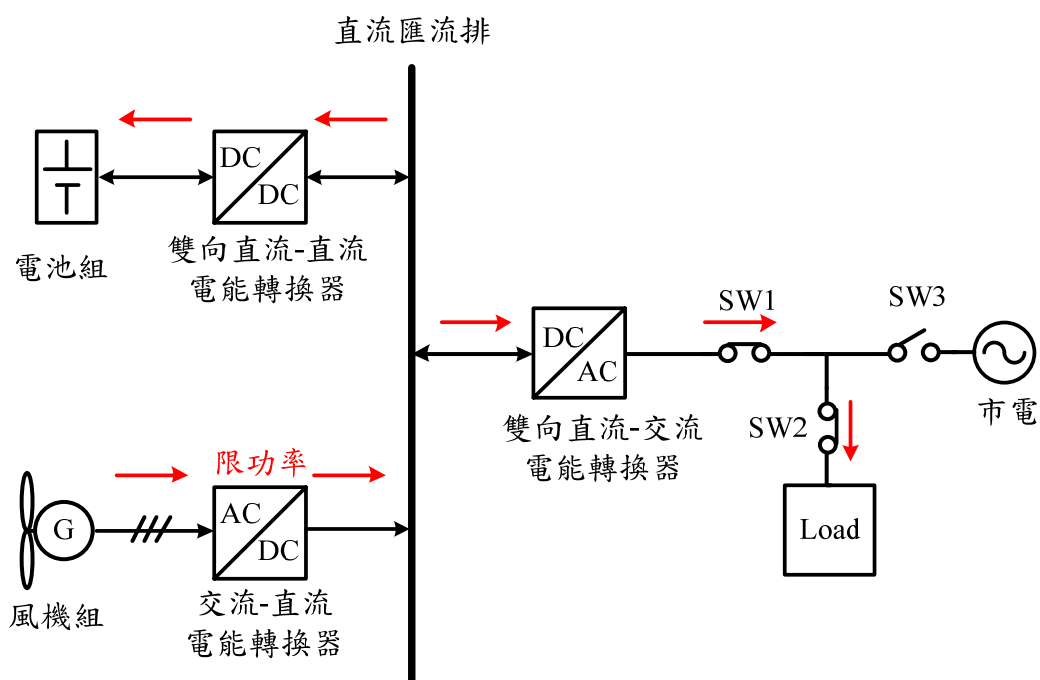


圖 30 具電池儲能之獨立型風力發電電能轉換介面模式七

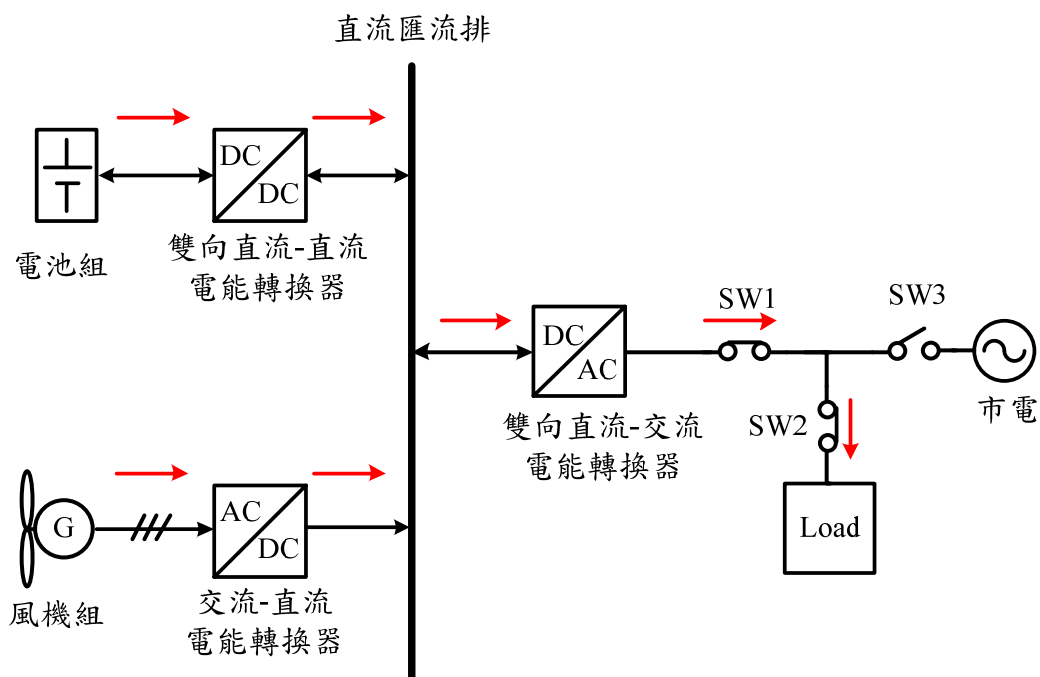


圖 31 具電池儲能之獨立型風力發電電能轉換介面模式八

圖 32 為具電池儲能之獨立型風力發電電能轉換介面之獨立運轉偵測之模擬結果。圖 32 (a)  $V_{in}$  為市電端電壓、圖 32 (b)  $V_{load}$  為負載端電壓、圖 32 (c)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 32 (d)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 32(e)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 32(f)  $i_{Rwind\_AC}$  為風力端 R 相電流、圖 32 (g)  $i_{bat}$  為電池端電流、圖 32(h)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 32(i)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出在 2.5 秒前為市電正常且未發生功率平衡；2.5 秒至 3 秒間市電正常且功率平衡，此時與負載連接之雙向直流-交流電能轉換器產生一擾動信號進行擾動，因擾動後，市電電流亦隨之變動，判定市電正常；於 3 秒時市電中斷，擾動後，市電電流仍近似於零，此時判斷為市電斷電，進入獨立運轉模式，直流匯流排改為電池穩壓，且由雙向直流-交流電能轉換器輸出一穩定交流電源，持續對負載及電池充放電。



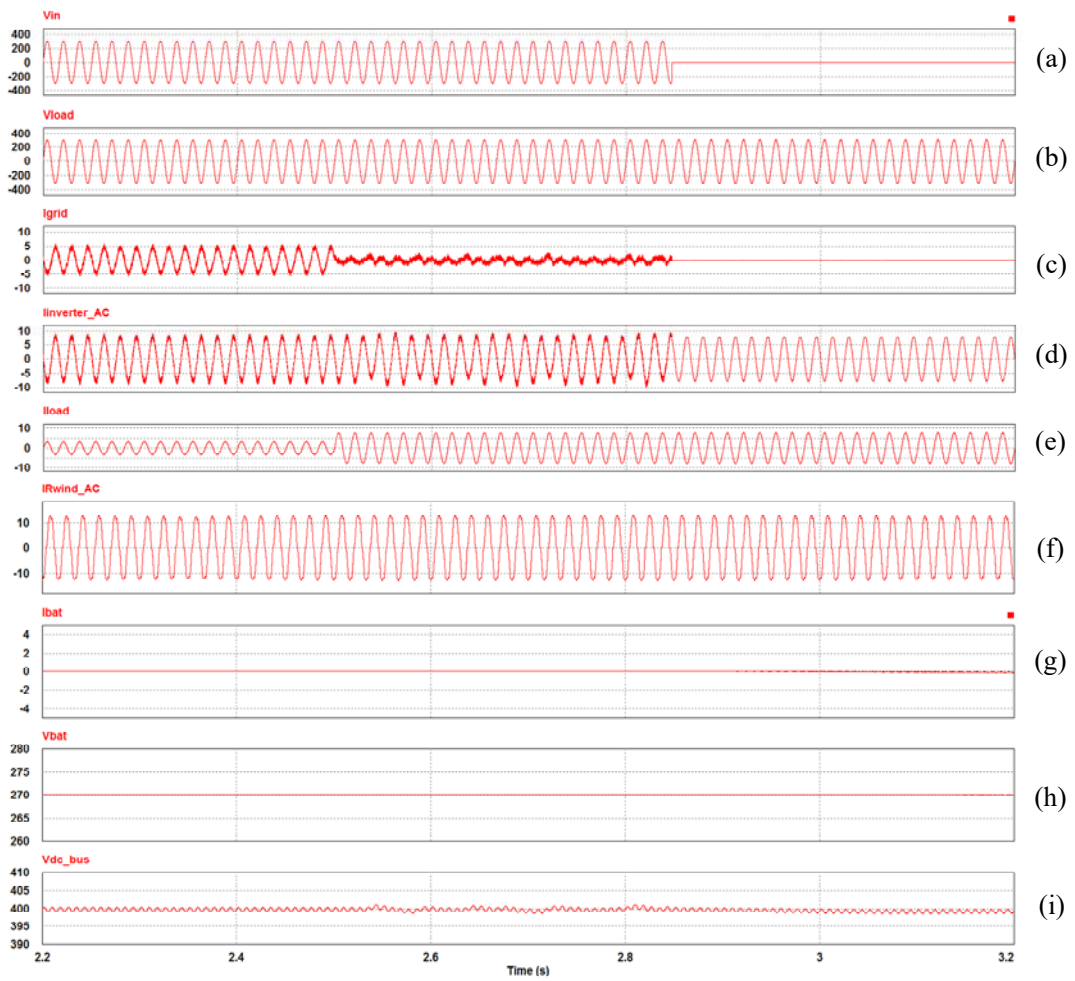


圖 32 為具電池儲能之獨立型風力發電電能轉換介面波形之獨立運轉偵測之模擬結果，(a) $V_{in}$ ，(b) $V_{load}$ ，(c) $i_{grid}$ ，(d) $i_{inverter\_AC}$ ，(e)  $i_{load}$ ，(f)  $i_{wind\_AC}$ ，(g) $i_{bat}$ ，(h) $V_{bat}$ ，(i) $V_{dc\_bus}$ 。

## 1、模式六 $P_{bat}+P_{load}>P_{wind}>P_{load}$

當風力發電產生之功率  $P_{wind}$  大於負載消耗之功率  $P_{load}$  時，此時多餘的風力功率對電池充電之功率  $P_{bat}$ ，具電池儲能之小型風力機發電系統之功率潮流如圖 29 所示。假設交流負載為 400W，風力發電機之最大輸出功率為 1KW。

圖 33 為模式六下具電池儲能之獨立型風力發電電能轉換介面之模擬結果。圖 33(a)  $V_{load}$  為負載端電壓、圖 33 (b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 33 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 33 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 33 (e)  $i_{Rwind\_AC}$  為風力端 R 相電流、圖 33 (f)  $i_{bat}$  為電池端電流圖 33 (g)  $P_{bat}$  為電池端功率、圖 33 (h)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 33 (i)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出在與市電連接之線路開關已經打開，1 秒時由與電池連接之雙向直流-直流電能轉換器維持額定 400V 直流電壓，並由雙向直流-交流電能轉換器維持交流負載端電壓 220V，此時風力發電進行 MPPT，當 1.8 秒時風力發電機產生之功率超過負載消耗之功率，直流匯流排電壓會上升到 405V，此時電池未充飽(設定 270V 電壓)，其穩壓方式為直流匯流排電壓大於 405V 時開啟電池充電模式，風力發電機產生之功率超過負載消耗之功率的部分對電池充電，直流

匯流排電壓下降至低於 405V 時關閉電池充電模式，當電池充電模式，負載消耗之剩餘功率使直流匯流排電壓很快上升至 405V，以上動作重複至風機輸出功率、負載消耗之功率與電池充電吸收之功率間達到功率平衡。

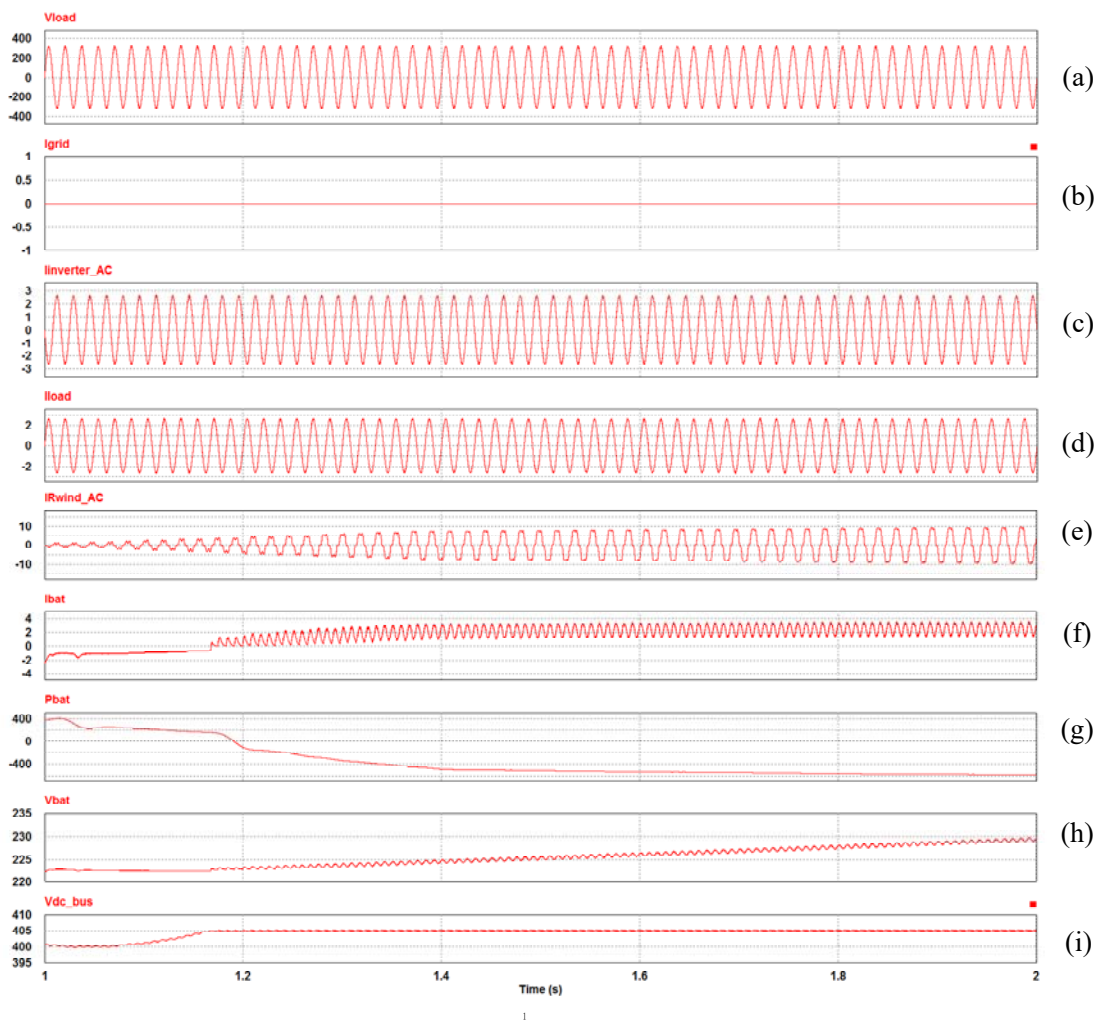


圖 33 模式六下具電池儲能之獨立型風力發電電能轉換介面之獨立運轉模擬結果，(a)  $V_{load}$ ，(b)  $i_{grid}$ ，(c)  $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{wind\_AC}$ ，(f)  $i_{bat}$ ，(g)  $P_{bat}$ ，(h)  $V_{bat}$ ，(i)  $V_{dc\_bus}$ 。

## 2、模式七 $P_{wind} > P_{bat} + P_{load}$

當小型風力機所提供之功率大於負載所需之功率且電池組之充電電壓或電流大於上限值時，此時直流-直流升壓式電能轉換器放棄 MPPT 之功能，而進入限功率模式，以減少小型風力機之輸出功率，以限制電池組之充電電流或電壓。在此模式下，具電池儲能之小型風力機發電系統之功率潮流如圖 30 所示，假設交流負載為 600W，風力發電機之最大輸出功率為 1KW。。

圖 34 為模式七下具電池儲能之獨立型風力發電電能轉換介面之模擬結果。圖 34 (a)  $V_{load}$  為負載端電壓、圖 34 (b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 34 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 34 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 34 (e)  $i_{Rwind\_AC}$  為風力端 R 相電流、圖 34 (f)  $i_{bat}$  為電池端電流、圖 34 (g)  $P_{bat}$  為電池端功率、圖 34 (h)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 34 (i)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出在 2.59 秒時電池充飽電(設定電壓 270V)，風力發電機產生之功率超過負載消耗之功率，直流匯流排電壓由 405V 上升至 410V，此時風力發電放棄 MPPT 運轉改為限功率運轉，穩壓方式為當直流匯流排電壓大於 410V 時減少風機之直流-直流電能轉換器之責任週期以降低風機輸出功率，當直流匯流排電壓低於 410V 時增加

風機之直流-直流電能轉換器責任週期用以增加風機輸出功率，以上動作重複至風機輸出功率、負載消耗之功率與電池充電吸收之功率間達到功率平衡。

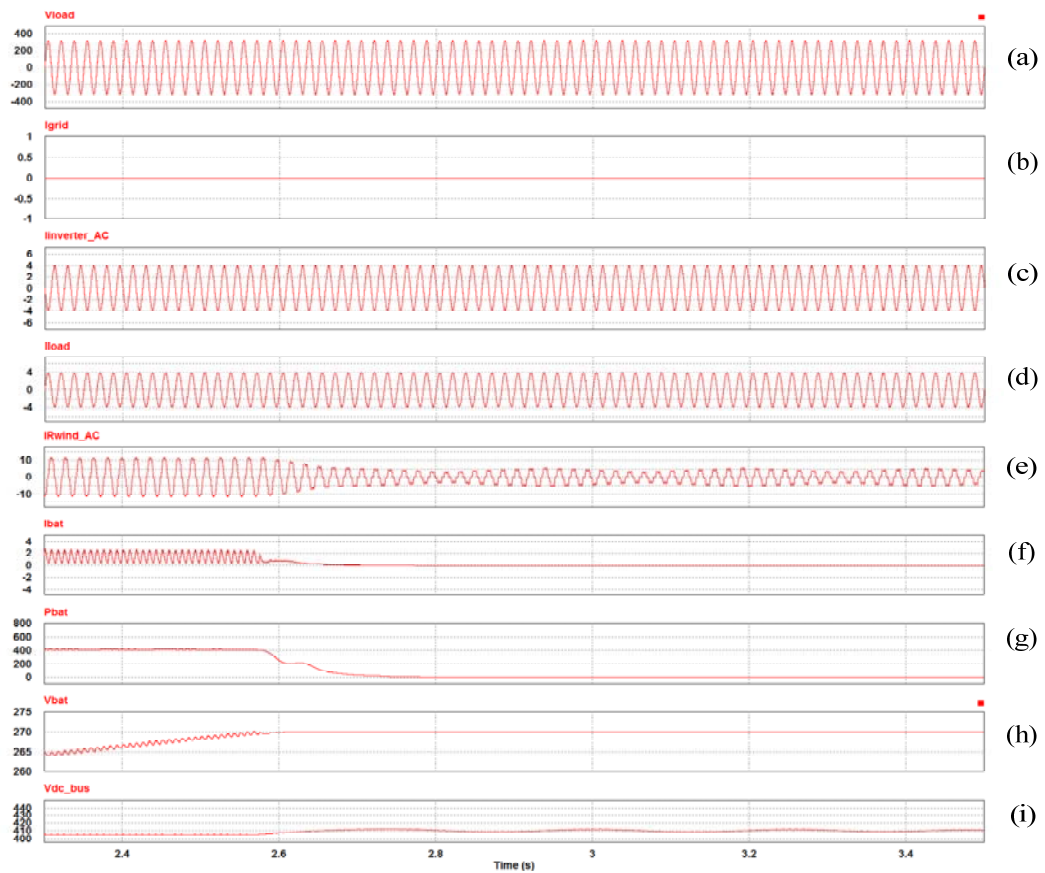


圖 34 模式七下具電池儲能之獨立型風力發電電能轉換介面之獨立運轉模擬結果，(a)  $V_{load}$ ，(b)  $i_{grid}$ ，(c)  $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{wind\_AC}$ ，(f)  $i_{bat}$ ，(g)  $P_{bat}$ ，(h)  $V_{bat}$ ，(i)  $V_{dc\_bus}$ 。

### 3、模式八 $P_{load} > P_{wind}$

當風力發電產生之功率  $P_{wind}$  小於負載消耗之功率  $P_{load}$  時，此時由電池提供負載不足之功率  $P_{bat}$ ，具電池儲能之小型風力機發電系統之功率潮流如圖 31 所示。假設交流負載為 1.4KW 卸載後為 700W，風力發電機之最大輸出功率為 1KW。

圖 35 為模式八下具電池儲能之獨立型風力發電電能轉換介面之模擬結果。圖 35 (a)  $V_{load}$  為負載端電壓、圖 35 (b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 35 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 35 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 35 (e)  $i_{Rwind\_AC}$  為風力端 R 相電流、圖 35 (f)  $i_{bat}$  為電池端電流、圖 35 (g)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 35 (h)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出在 1.8 秒至 2.28 秒期間由連接電池組之雙向直流-直流轉換器來穩定直流匯流排電壓，電池組與風力發電共同提供負載消耗之電能，當 2.28 秒之後電池因放電至保護電壓 200V，電池停止放電，由於風力所產生之電能不足負載所需之電能，直流匯流排電壓會往下降至 395V 時，此時必須進行卸載，假設卸載後負載消耗之電能小於風力發電產生之電能，直流匯流排會持續上升到達 405V 時，其穩壓方式為直流匯流排電壓大於 405V 時開啟電池充電模式，風力發電機產生之功率超過負載

消耗之功率的部分對電池充電，直流匯流排電壓下降至低於 405V 時關閉電池充電模式，當電池充電模式，負載消耗之剩餘功率使直流匯流排電壓很快上升至 405V，以上動作重複至風機輸出功率、負載消耗之功率與電池充電吸收之功率間達到功率平衡。與模式六相同，並由由模式八跳回至模式六，電池開始充電。

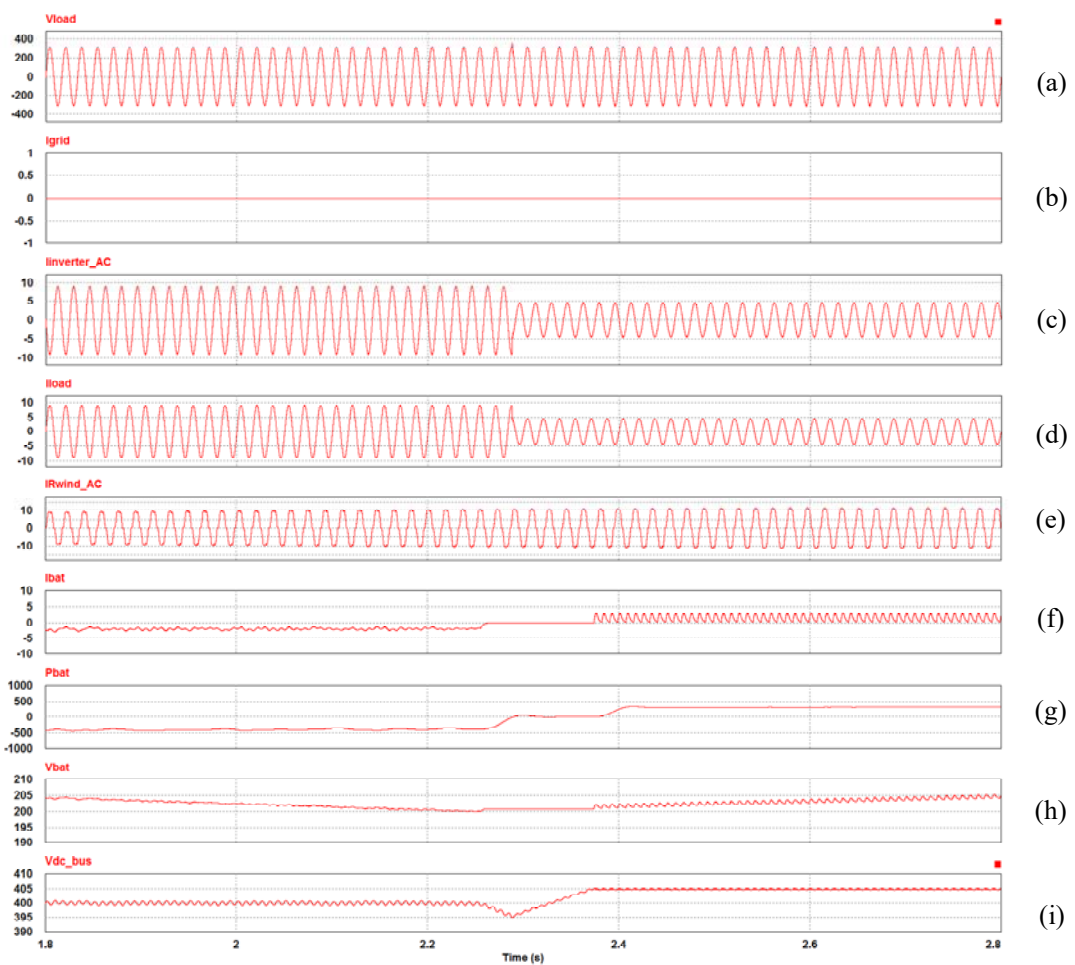


圖 35 模式八下具電池儲能之獨立型風力發電電能轉換介面之獨立運轉模擬結果，(a)  $V_{load}$ ，(b)  $i_{grid}$ ，(c)  $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{wind\_AC}$ ，(f)  $i_{bat}$ ，(g)  $P_{bat}$ ，(h)  $V_{bat}$ ，(i)  $V_{dc\_bus}$ 。

### (三)、具電池儲能之併網型太陽能發電電能轉換介面

當市電正常時，具電池儲能之併網型太陽能發電電能轉換介面經由線路開關與市電併聯運轉，在此情況下，具電池儲能之併網型太陽能發電電能轉換介面依據電池組之充/放電狀態，可區分為五種工作模式，如圖 36 至圖 40。在電池組充電時有三種工作模式分別為模式一、模式二及模式三，在電池組放電時亦有兩種工作模式分別為模式四及模式五。當市電正常時連接太陽能之電能轉換器隨時執行 MPPT 功能；而電池之定電流充電電流為 15A(100AH 電池之 0.15C)，而定電壓充電之電壓為 270V(13.5V/顆\*20 顆)，而電池之定功率放電功率 1KW。

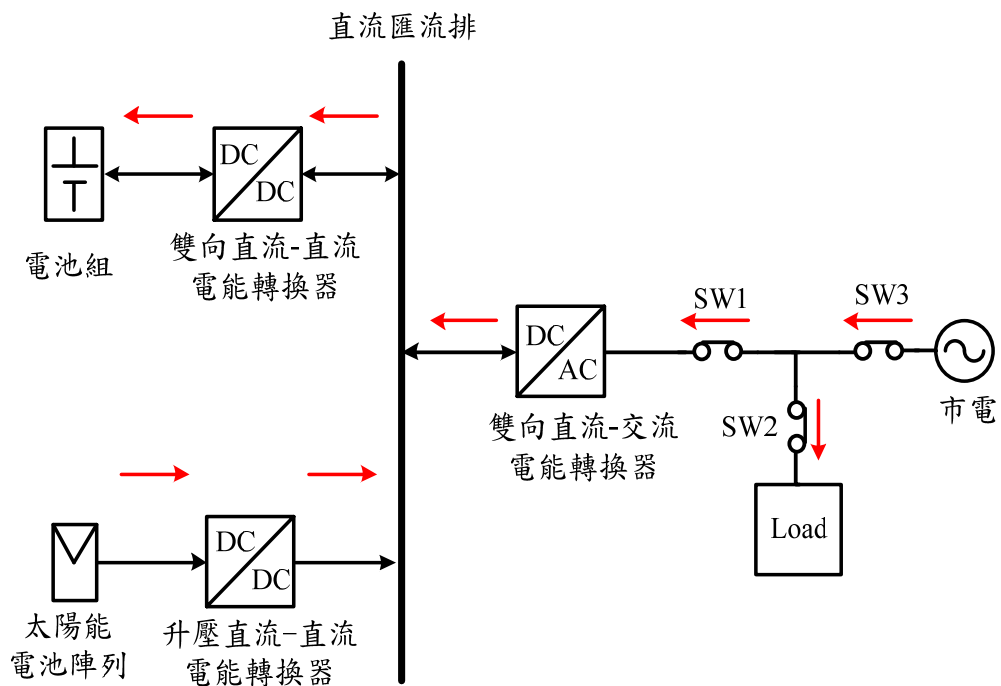


圖 36 具電池儲能之併網型太陽能發電電能轉換介面模式一



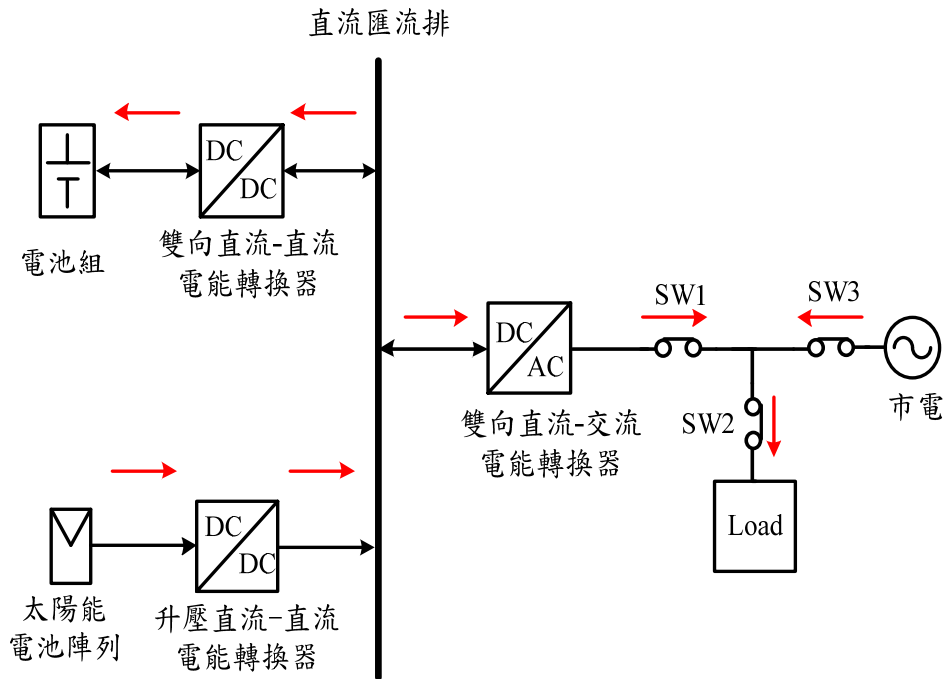


圖 37 具電池儲能之併網型太陽能發電電能轉換介面模式二

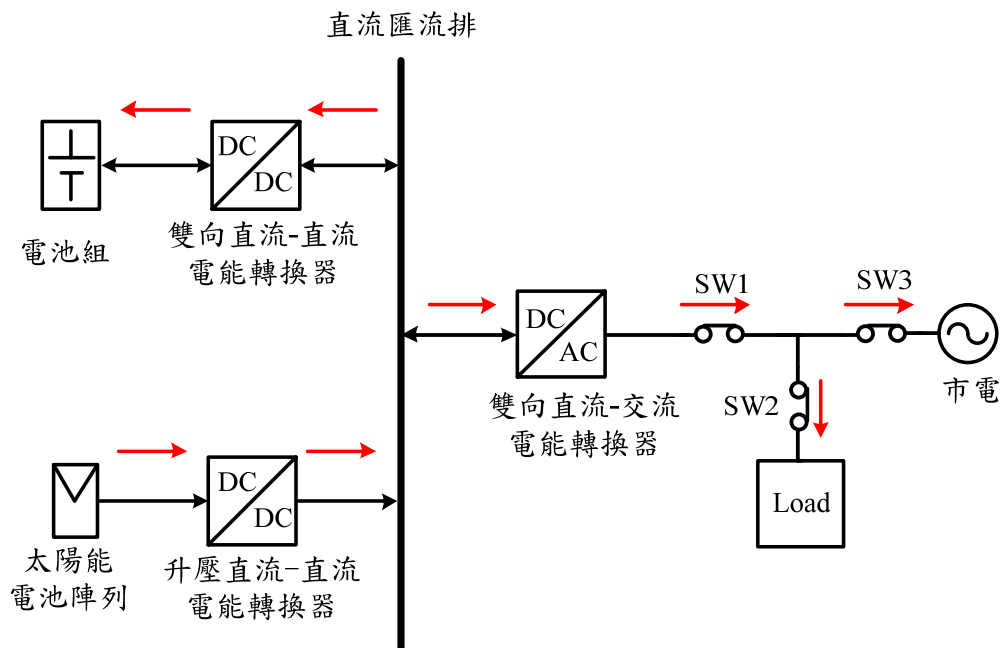


圖 38 具電池儲能之併網型太陽能發電電能轉換介面模式三

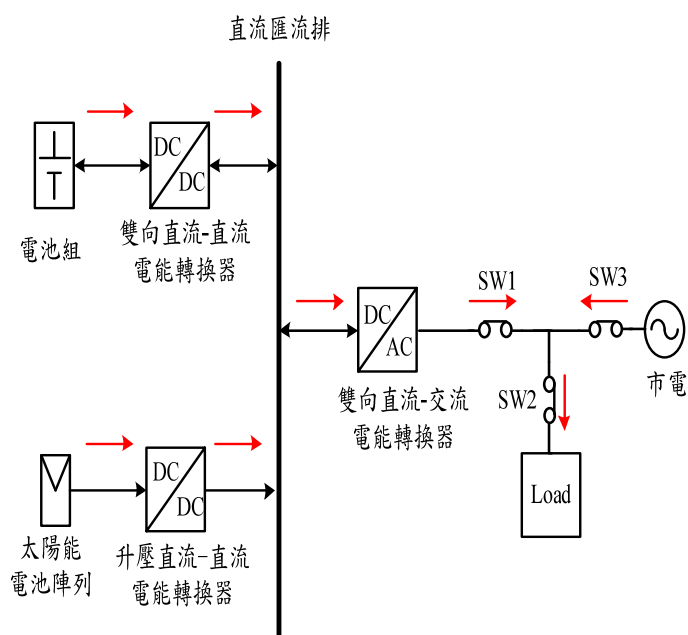


圖 39 具電池儲能之併網型太陽能發電電能轉換介面模式四

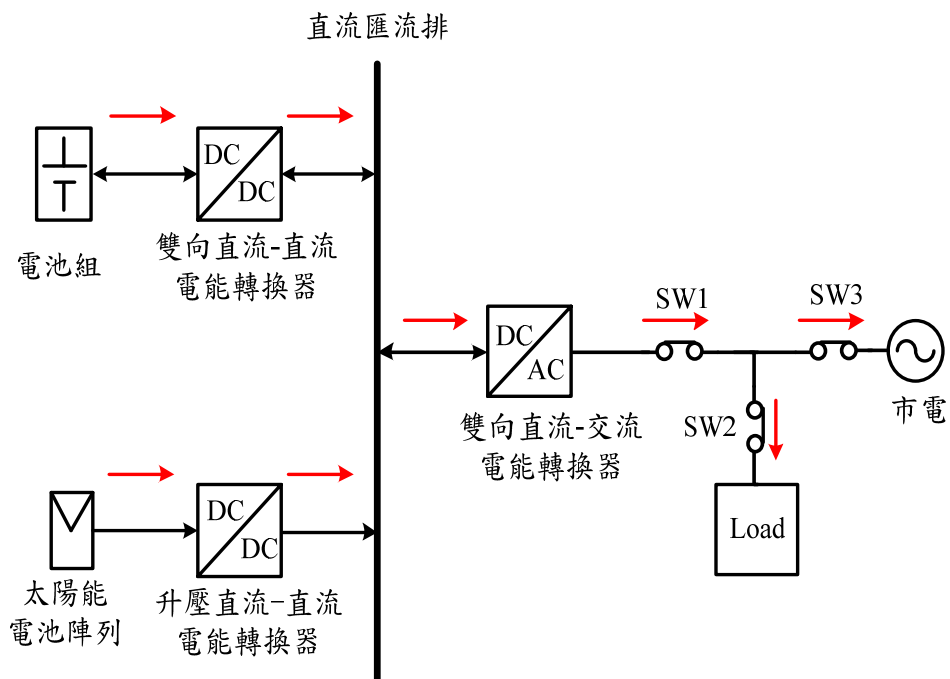
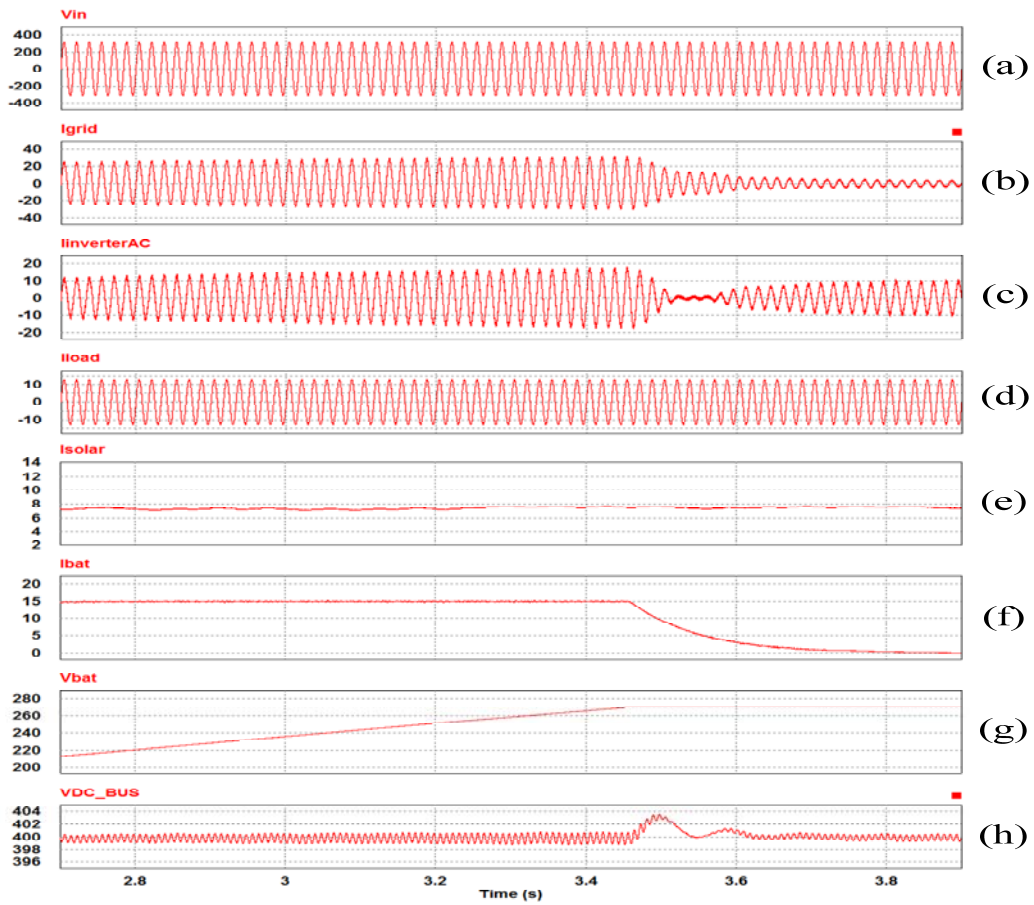


圖 40 具電池儲能之併網型太陽能發電電能轉換介面模式五

1、模式一： $P_{\text{solar}} < P_{\text{bat}}$

當電池尚未充飽電狀態下，太陽能發電產生之電能優先對電池充電，而不注入市電或提供給負載，因此其功率潮流如圖 36 所示。假設此時負載為 2KW，太陽能板所受照度為 850W/m<sup>2</sup>，溫度為攝氏 55 度，太陽能發電之最大輸出功率為 1.5KW。

圖 41 為模式一下具電池儲能之併網型太陽能發電電能轉換介面穩態之模擬結果。圖 41 (a)  $V_{in}$  為市電端電壓、圖 41 (b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 41 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 41 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 41 (e)  $i_{solar}$  為太陽能輸出電流、圖 41 (f)  $i_{bat}$  為電池端電流、圖 41 (g)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 41 (h)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出 2.7 秒~3.47 秒前的穩態波形，此時電池進行 CC 充電。由圖中可看出市電供電給負載，同時市電與太陽能結合以 15A 之定電流對電池充電，而於 3.47 秒時達到電池之轉態電壓 270V，此時開始轉為以 270V 進行定電壓充電，於 3.47 秒由定電流轉變成定電壓充電時，電池所需充電電流減少，因此太陽能發電除了提供電池充電電力，並將太陽能發電用於充電後之多餘之電力經雙向直流-交流電能轉換器提供給負載。

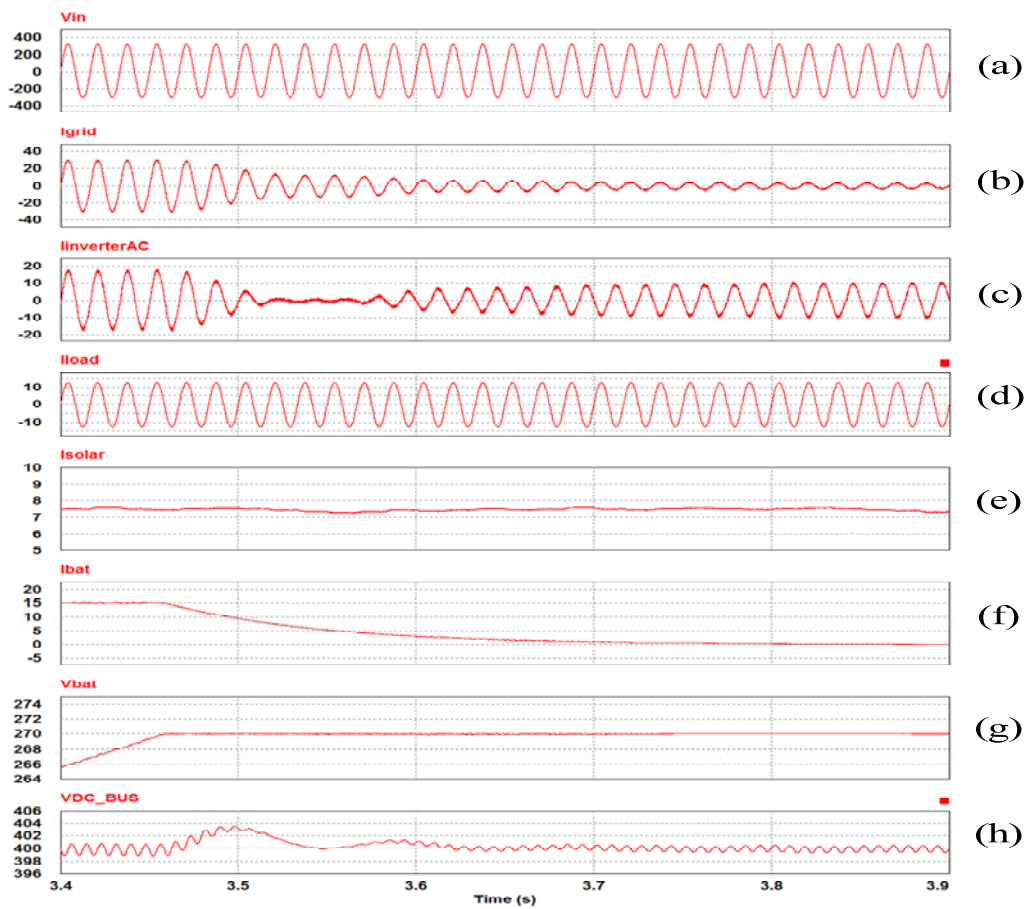


圖

41 模式一下具電池儲能之併網型太陽能發電電能轉換介面穩態之模擬結果，(a) $V_{in}$ ，(b) $i_{grid}$ ，(c) $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{solar}$ ，(f) $i_{bat}$ ，(g) $V_{bat}$ ，(h) $V_{dc\_bus}$ 。

圖 42 為模式一下具電池儲能之併網型太陽能發電電能轉換介面暫態之模擬結果。圖 42 (a)  $V_{in}$  為市電端電壓、圖 42 (b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 42 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 42 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 42 (e)  $i_{solar}$  為太陽能輸出電流、圖 42 (f)  $i_{bat}$  為電池端電流、圖 42 (g)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 42 (h)  $V_{dc\_bus}$

為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出在 3.47 秒電池充電至額定電壓 270V 由定電流充電轉為定電壓充電，定電壓充電所需之電池充電電流減少，太陽能發電除了提供電池充電電力，並將太陽能發電用於充電後之多餘之電力經雙向直流-交流電能轉換器提供給負載。



圖

42 模式一下具電池儲能之併網型太陽能發電電能轉換介面暫態之模擬結果，(a) $V_{in}$ ，(b) $i_{grid}$ ，(c) $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{solar}$ ，(f) $i_{bat}$ ，(g) $V_{bat}$ ，(h) $V_{dc\_bus}$ 。

## 2、模式二 $P_{bat}+P_{load}>P_{solar}>P_{bat}$ (假設電池充飽電)

當太陽能發電產生之功率  $P_{solar}$  大於電池充電所需之功率  $P_{bat}$  但小於負載消耗之功率  $P_{load}$  與電池充電所需之功率  $P_{bat}$  之和 ( $P_{bat}+P_{load}$ )時,其功率潮流如圖 37 所示。假設此時交流負載為 3KW,太陽能板所受照度為  $850W/m^2$ ,溫度為攝氏 55 度,太陽能發電之最大輸出功率為 1.5KW,電池充飽電。

圖 43 模式二下具電池儲能之併網型太陽能發電電能轉換介面之暫態電壓與電流之模擬結果。圖 43 (a)  $V_{in}$  為市電端電壓、圖 43 (b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 43 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 43 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 43 (e)  $i_{solar}$  為太陽能輸出電流、圖 43 (f)  $i_{bat}$  為電池端電流、圖 43 (g)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 43 (h)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出 1 秒前太陽能發電未啟動,負載電力由市電提供;太陽能發電於 1 秒開始啟動並開始進行 MPPT,此時直流匯流排電壓會有暫態電壓,而雙向直流-交流電能轉換器之交流端電流逐步增加,市電電流逐漸減少,最後太陽能發電與市電電流共同供給負載電力,並達到功率平衡。

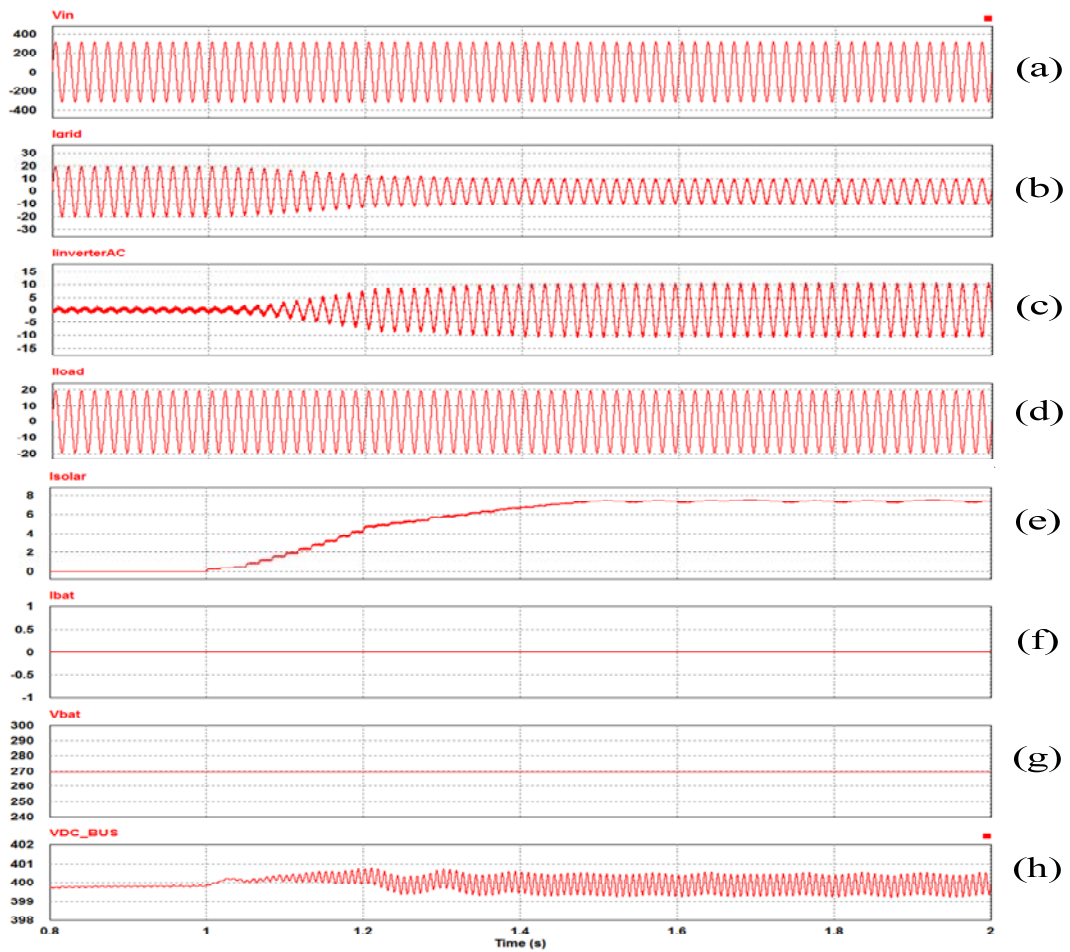


圖 43 模式二下具電池儲能之併網型太陽能發電電能轉換介面暫態之模擬結果，(a) $V_{in}$ ，(b) $i_{grid}$ ，(c) $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{solar}$ ，(f) $i_{bat}$ ，(g) $V_{bat}$ ，(h) $V_{dc\_bus}$ 。

圖 44 為模式二下具電池儲能之併網型太陽能發電電能轉換介面之穩態電壓與電流之模擬結果。圖 44 (a)  $V_{in}$  為市電端電壓、圖 44 (b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 44 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 44 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 44 (e)  $i_{solar}$  為太陽能輸出電流、圖 44 (f)  $i_{bat}$  為電池端電流、圖 44 (g)  $V_{bat}$  為電池端電

壓、圖 44 (h)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出 2 秒後之穩態波形其負載所需之電力係由市電與太陽能共同提供。

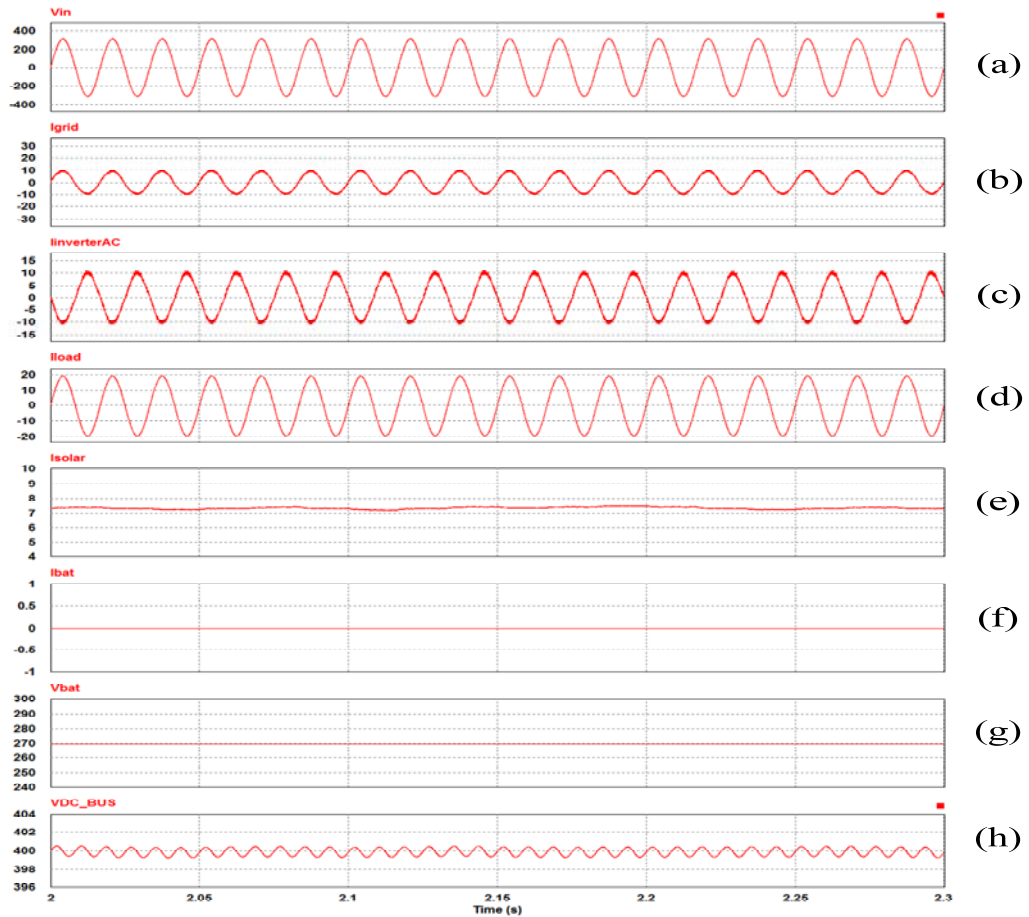


圖 44 模式二下具電池儲能之併網型太陽能發電電能轉換介面穩態之模擬結果，(a) $V_{in}$ ，(b) $i_{grid}$ ，(c) $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{solar}$ ，(f) $i_{bat}$ ，(g) $V_{bat}$ ，(h) $V_{dc\_bus}$ 。



### 3、模式三 $P_{bat}+P_{load} < P_{solar}$ (假設電池充飽電)

當太陽能發電產生之功率  $P_{solar}$  大於負載消耗之功率  $P_{load}$  與電池充電所需之功率  $P_{bat}$  之和( $P_{bat}+P_{load}$ )時，其功率潮流如圖 38 所示。假設交流負載為 1KW，太陽能板所受照度為 850W/m\*m，溫度為攝氏 55 度，太陽能發電之最大輸出功率為 1.5KW，電池充飽電。

圖 45 為模式三下具電池儲能之併網型太陽能發電電能轉換介面之暫態電壓與電流之模擬結果。圖 45 (a)  $V_{in}$  為市電端電壓、圖 45 (b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 45 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 45 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 45(e)  $i_{solar}$  為太陽能輸出電流、圖 45 (f)  $i_{bat}$  為電池端電流、圖 45 (g)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 45(h)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出 1 秒前太陽能發電未啟動，負載電力由市電提供；太陽能發電於 1 秒開始啟動，並開始進行 MPPT，使雙向直流-交流電能轉換器之交流端電流逐步增加，太陽能除提供負載所需之電力外，最後部份太陽能產生之電力注入市電，並達到功率平衡。

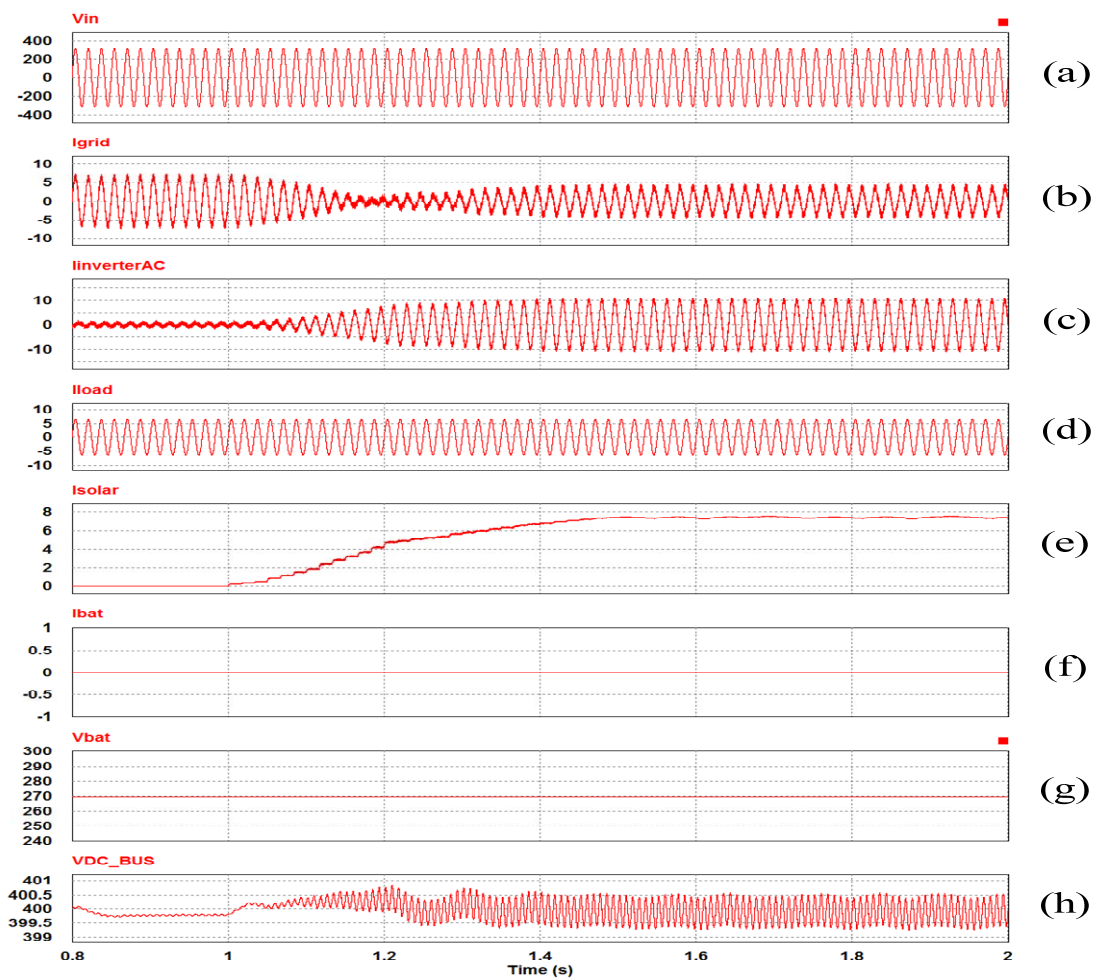


圖 45 模式三下具電池儲能之併網型太陽能發電電能轉換介面暫態之模擬結果，(a) $V_{in}$ ，(b) $i_{grid}$ ，(c) $i_{inverter\_AC}$ ，(d) $i_{load}$ ，(e) $i_{solar}$ ，(f) $i_{bat}$ ，(g) $V_{bat}$ ，(h) $V_{dc\_bus}$ 。

圖 46 為模式三下具電池儲能之併網型太陽能發電電能轉換介面之穩態電壓與電流之模擬結果。圖 46 (a)  $V_{in}$  為市電端電壓、圖 46 (b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 46 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 46 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 46(e)  $i_{solar}$  為太陽

能輸出電流、圖 46 (f)  $i_{bat}$  為電池端電流、圖 46 (g)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 46(h)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出太陽能除提供負載所需之電流外，部份太陽能產生之電力注入市電。

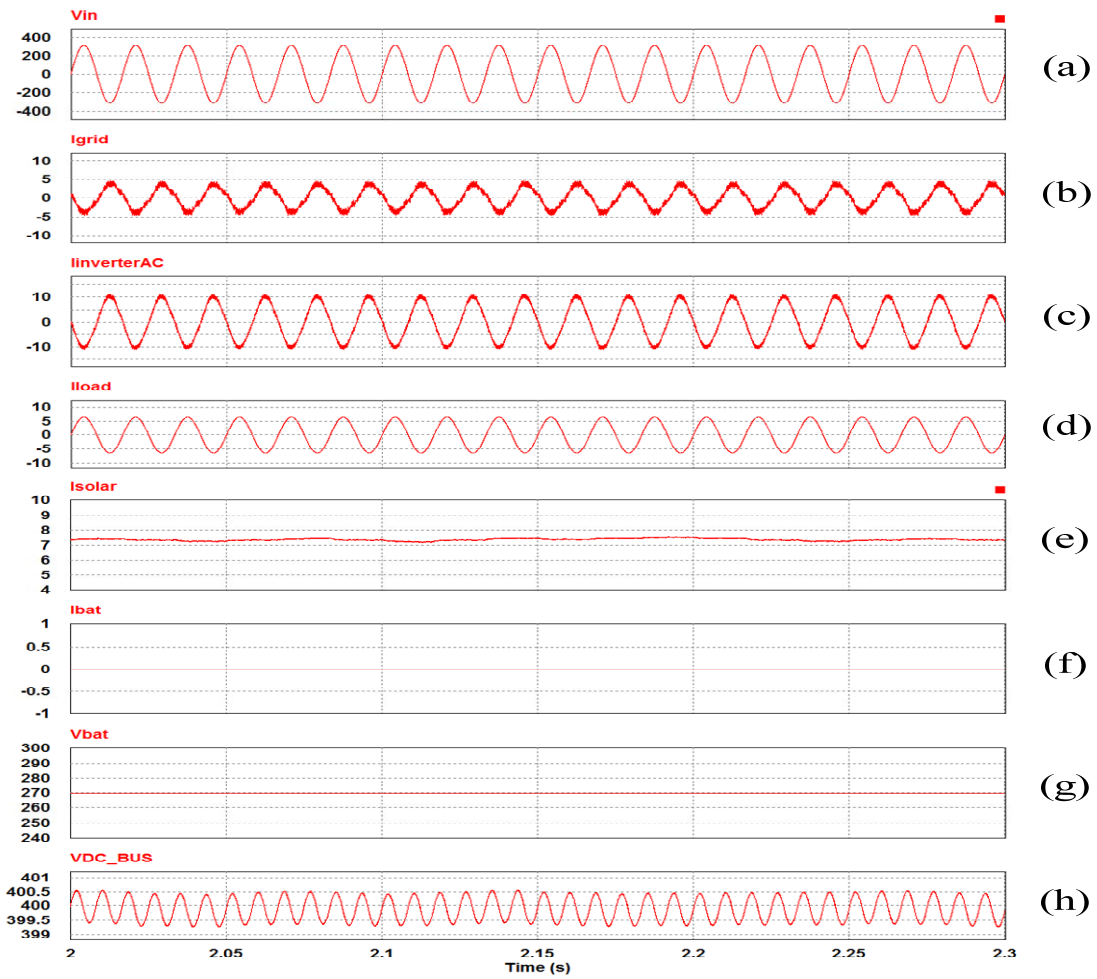


圖 46 模式三下具電池儲能之併網型太陽能發電電能轉換介面穩態之模擬結果，(a) $V_{in}$ ，(b) $i_{grid}$ ，(c) $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{solar}$ ，(f) $i_{bat}$ ，(g) $V_{bat}$ ，(h) $V_{dc\_bus}$ 。

#### 4、模式四 $P_{load} > P_{solar} + P_{bat}$

當負載消耗之功率  $P_{load}$  大於太陽能發電產生之功率  $P_{solar}$  與電池放充電產生之功率  $P_{bat}$  時( $P_{solar} + P_{bat}$ )，其功率潮流如圖 39 所示。假設交流負載為 4KW，太陽能板所受照度為 850W/m<sup>2</sup>，溫度為攝氏 55 度，太陽能發電之最大輸出功率為 1.5KW，電池輸出功率 1KW。

圖 47 為模式四下具電池儲能之併網型太陽能發電電能轉換介面之模擬結果。圖 47 (a)  $V_{in}$  為市電端電壓、圖 47 (b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 47 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 47 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 47(e)  $i_{solar}$  為太陽能輸出電流、圖 47 (f)  $P_{bat}$  為電池端功率、圖 47 (g)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 47(h)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。模擬結果可看出電池以定功率 1KW 放電，電池與太陽能發電之電力經由雙向直流-交流電能轉換器至交流端，並結合市電電流供給負載電流，約在 3.99 秒，由於電池電壓放電至為防止過放之保護電壓，所以電池停止定功率放電，此時由於電池停止輸出電力，僅太陽能發電之電力經由雙向直流-交流電能轉換器至交流端，而市電供給負載電力增加。

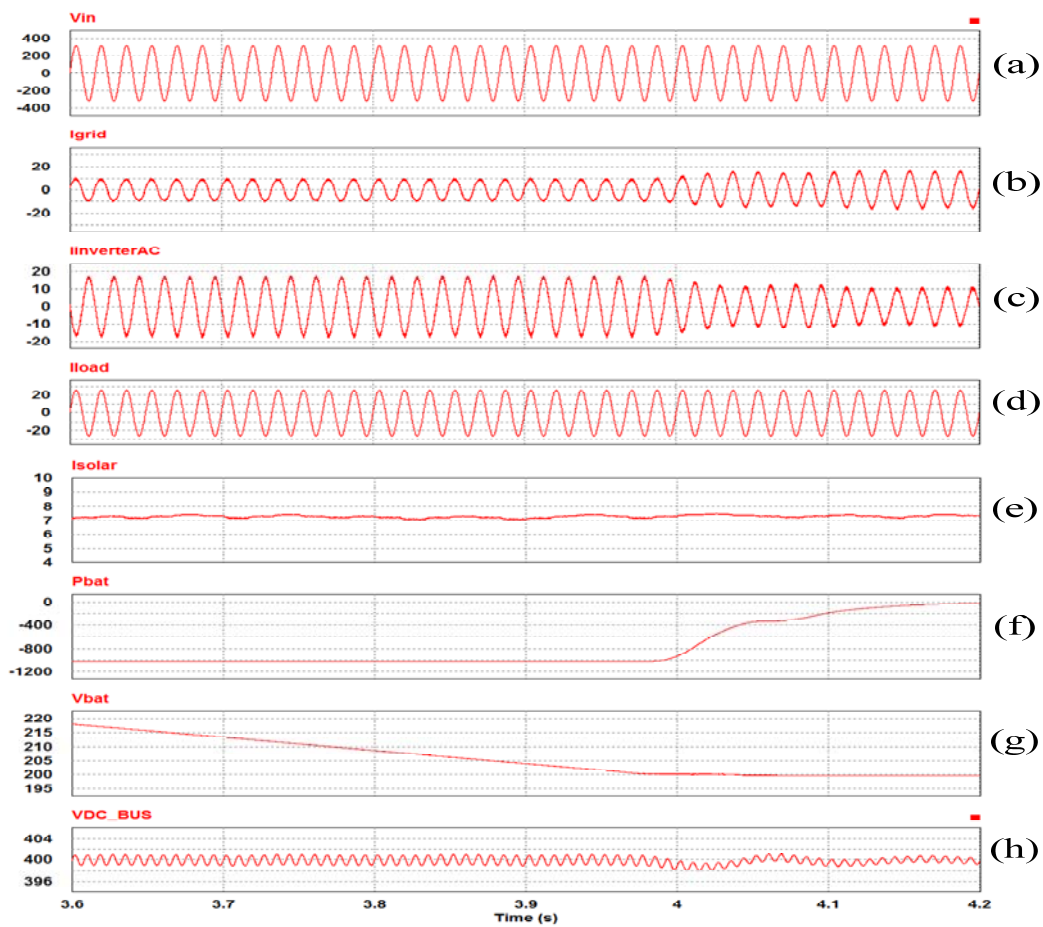


圖 47 模式四下具電池儲能之併網型太陽能發電電能轉換介面之模擬結果，(a) $V_{in}$ ，(b) $i_{grid}$ ，(c) $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{solar}$ ，(f) $P_{bat}$ ，(g) $V_{bat}$ ，(h) $V_{dc\_bus}$ 。

### 5、模式五 $P_{load} < P_{solar} + P_{bat}$

當太陽能發電產生之功率  $P_{solar}$  與電池放充電產生之功率  $P_{bat}$  之和( $P_{solar} + P_{bat}$ )大於負載消耗功率  $P_{load}$  時，多餘的功率會饋入市電端，其功率潮流如圖 40 所示。假設交流負載為 1KW，太陽能板所受照度為  $850W/m^2$ ，溫度為攝氏 55 度，太陽能發電之最大輸出

功率為 1.5KW，電池輸出功率 1KW。

圖 48 為模式五下具電池儲能之併網型太陽能發電電能轉換介面之模擬結果。圖 48 (a)  $V_{in}$  為市電端電壓、圖 48 (b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 48 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 48 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 48(e)  $i_{solar}$  為太陽能輸出電流、圖 48 (f)  $P_{bat}$  為電池端功率、圖 48 (g)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 48(h)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。模擬結果可看出電池以定功率 1KW 放電，電池與太陽能發電之電力經由雙向直流-交流電能轉換器至交流端，除了供給負載電力之外將多餘電力饋入市電端，於 3.99 秒時，由於電池電壓放電至防止過放之保護電壓，所以電池停止定功率放電，此時由於電池停止輸出電力，僅太陽能發電之電力經由雙向直流-交流電能轉換器至交流端，因此饋入市電之電流減少。

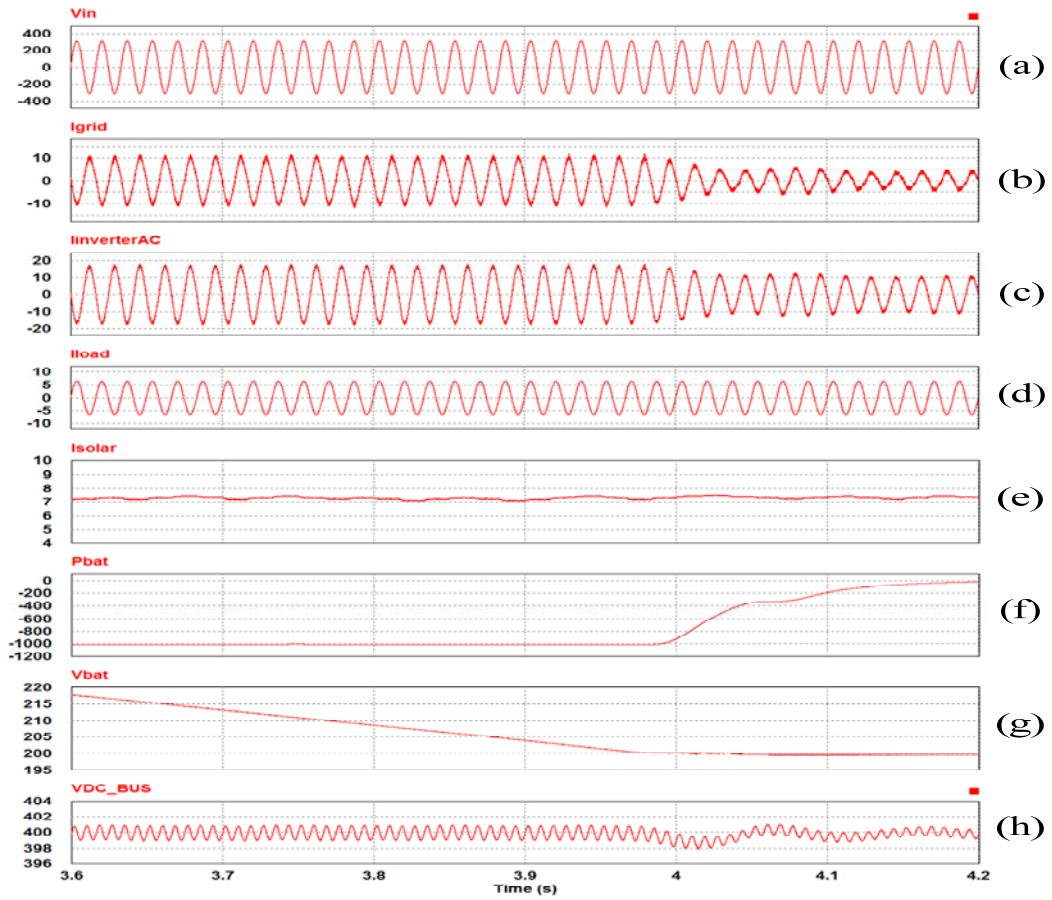


圖 48 模式五下具電池儲能之併網型太陽能發電電能轉換介面之模擬

結果，(a) $V_{in}$ ，(b) $i_{grid}$ ，(c) $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{solar}$ ，(f) $P_{bat}$ ，(g) $V_{bat}$ ，

(h) $V_{dc\_bus}$ 。

#### (四)、具電池儲能之獨立型太陽能發電電能轉換介面

當市電斷電時，具電池儲能之併網型太陽能發電電能轉換介面經由線路開關打開使系統切離市電，在此情況下，具電池儲能之獨立型太陽能發電電能轉換介面形成一不斷電電源供應器介面，依據電池組之充/放電狀態，可區分為三種工作模式，如圖 49 至圖 51，在電池組充電時有兩種工作模式為模式六及模式七，在電池組放電時有一種工作模式為模式八。當獨立運轉時根據交流端負載大小決定電池充放電與太陽能是否放棄 MPPT；而電池之充電電力為太陽能發電供給負載消耗完之剩餘電力。

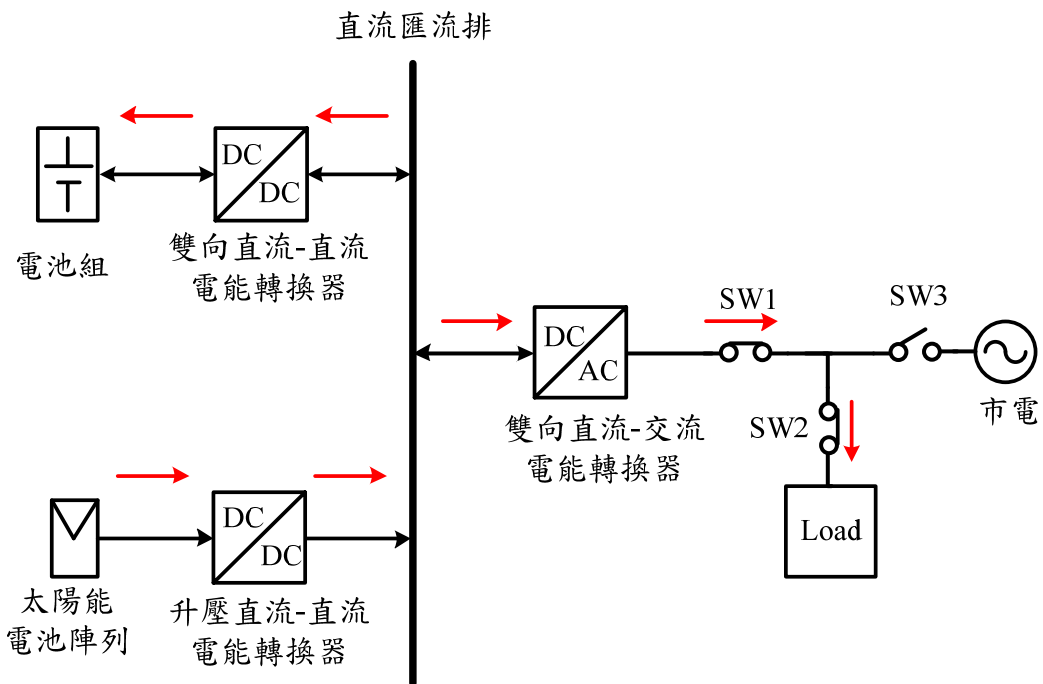


圖 49 具電池儲能之獨立型太陽能發電電能轉換介面模式六



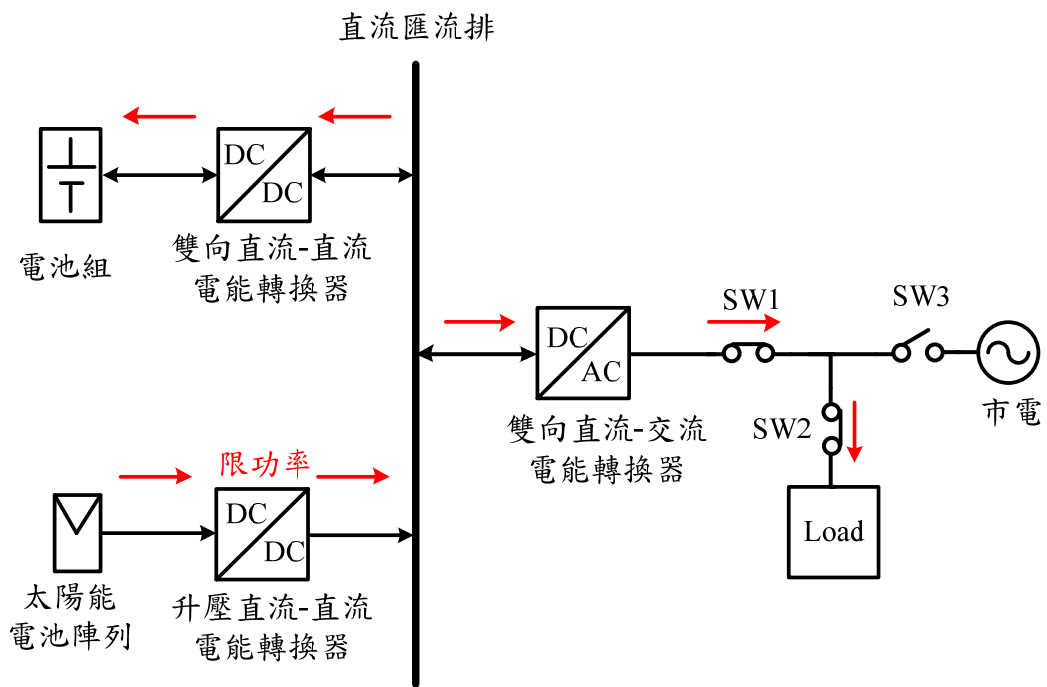


圖 50 具電池儲能之獨立型太陽能發電電能轉換介面模式七

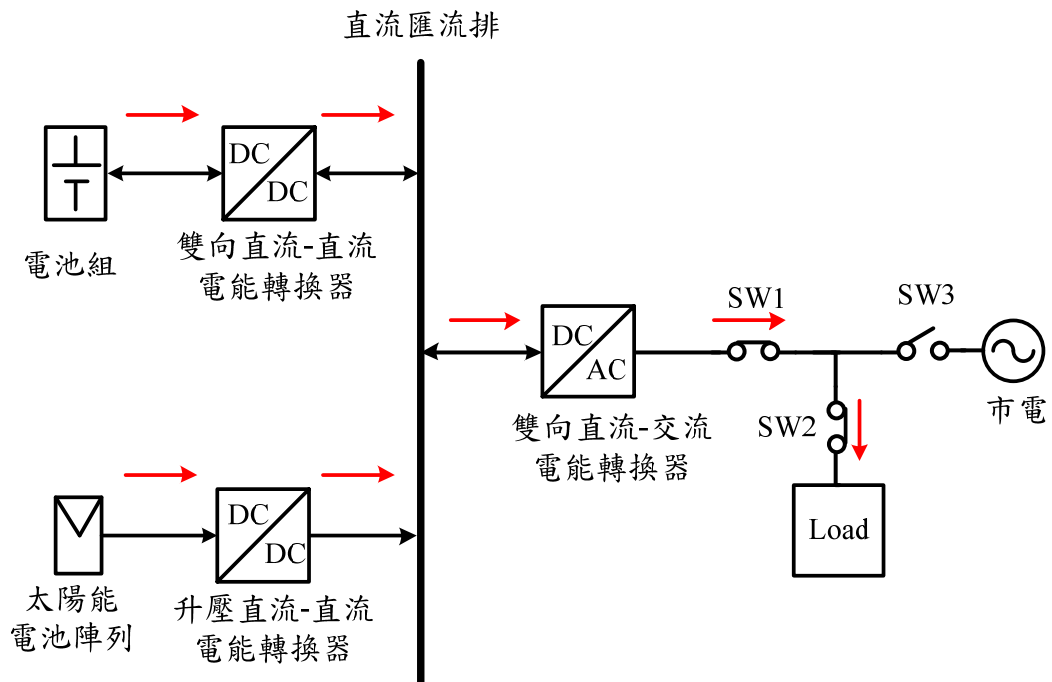


圖 51 具電池儲能之獨立型太陽能發電電能轉換介面模式八

圖 52 為具電池儲能之獨立型太陽能發電電能轉換介面波形之獨立運轉偵測之模擬結果。圖 52 (a)  $V_{in}$  為市電端電壓、圖 52 (b)  $V_{load}$  為負載端電壓、圖 52 (c)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 52 (d)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 52(e)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 52(f)  $i_{solar}$  為太陽能輸出電流、圖 52 (g)  $i_{bat}$  為電池端電流、圖 52(h)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 52(i)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出在 2.5 秒前為市電正常且未發生功率平衡；2.5 秒至 3 秒間市電正常且功率平衡，此時與負載連接之雙向直流-交流電能轉換器產生一擾動信號進行擾動，因擾動後，市電電流亦隨之變動，判定市電正常；於 3 秒時市電中斷，經擾動後，市電電流仍近似於零，此時判斷為市電斷電，進入獨立運轉模式，直流匯流排改為電池穩壓，且由雙向直流-交流電能轉換器輸出一穩定交流電壓，持續對負載供電及作電池充放電。

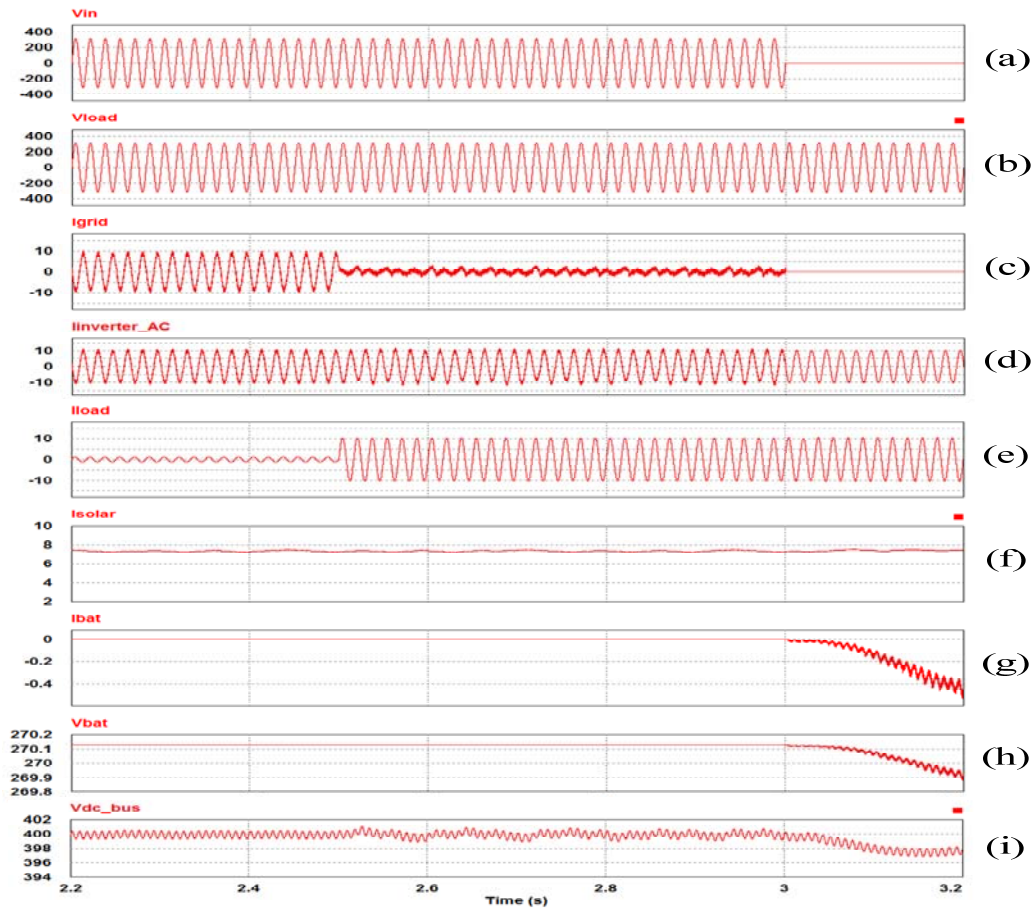


圖 52 為具電池儲能之獨立型太陽能發電電能轉換介面波形之獨立運轉偵測之模擬結果，(a) $V_{in}$ ，(b) $V_{load}$ ，(c) $i_{grid}$ ，(d) $i_{inverter\_AC}$ ，(e)  $i_{load}$ ，(f)  $i_{solar}$ ，(g) $i_{bat}$ ，(h) $V_{bat}$ ，(i) $V_{dc\_bus}$ 。

### 1、模式六 $P_{bat}+P_{load}>P_{solar}>P_{load}$

當太陽能發電產生之功率  $P_{solar}$  大於負載消耗之功率  $P_{load}$  時，此時多餘的太陽能功率對電池充電之功率  $P_{bat}$ ，具電池儲能之太陽能發電系統之功率潮流如圖 49 所示。假設交流負載為 400W，太陽能板所受照度為 850W/m<sup>2</sup>，溫度為攝氏 55 度，太陽能發電機

之最大輸出功率為 1.5KW。

圖 53 為模式六下具電池儲能之獨立型太陽能發電電能轉換介面之模擬結果。圖 53(a)  $V_{load}$  為負載端電壓、圖 53 (b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 53 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 53 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 53 (e)  $i_{solar}$  為太陽能輸出電流、圖 53 (f)  $i_{bat}$  為電池端電流圖 53 (g)  $P_{bat}$  為電池端功率、圖 53 (h)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 53 (i)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出與市電連接之線路開關已經打開，1 秒時由與電池連接之雙向直流-直流電能轉換器維持額定 400V 直流電壓，並由雙向直流-交流電能轉換器維持交流負載端電壓 220V，此時太陽能發電進行 MPPT，當 1.16 秒時太陽能發電產生之功率超過負載消耗之功率，直流匯流排電壓會上升到 405V，此時電池未充飽(設定 270V 電壓)，其穩壓方式為直流匯流排電壓大於 405V 時開啟電池充電模式，太陽能發電產生之功率超過負載消耗之功率對電池充電，直流匯流排電壓下降至低於 405V 時關閉電池充電模式，當電池充電模式，負載消耗之剩餘功率使直流匯流排電壓很快上升至 405V，以上動作重複至太陽能輸出功率、負載消耗之功率與電池充電吸收之功率間達到功率平衡。

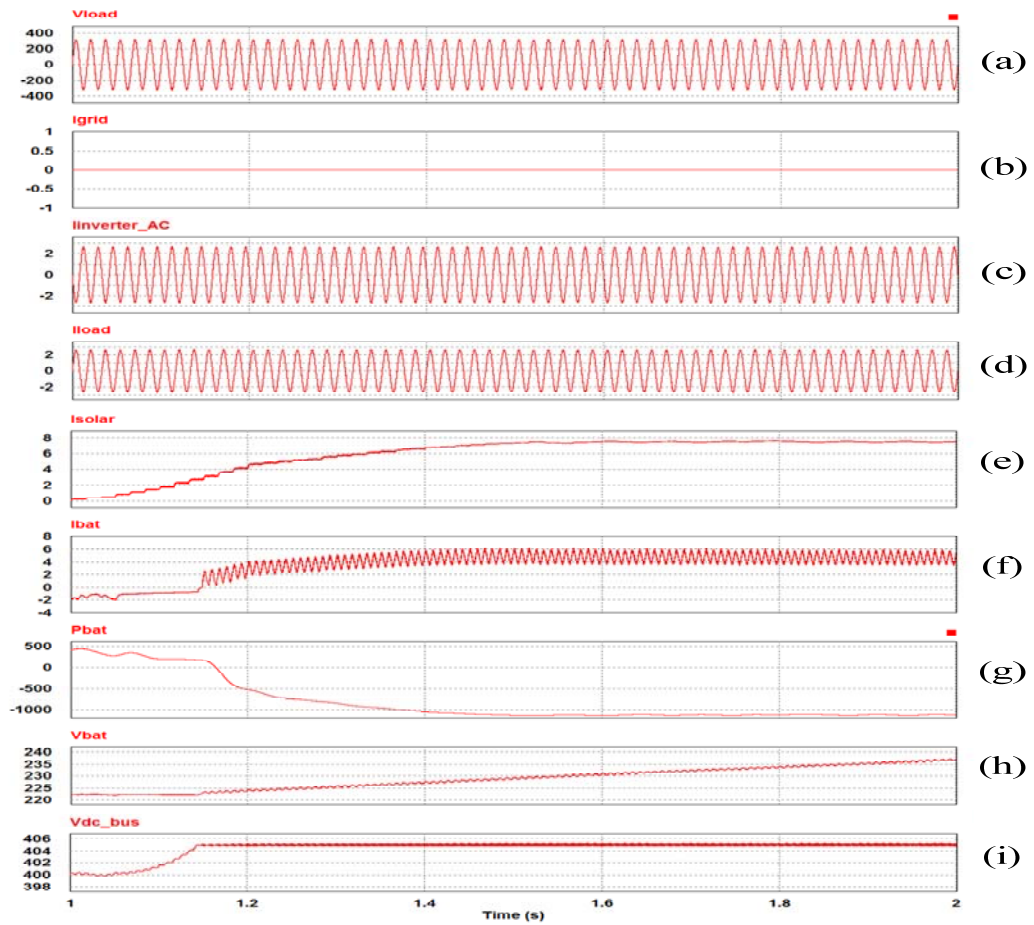


圖 53 模式六下具電池儲能之獨立型太陽能發電電能轉換介面之獨立運轉模擬結果，(a)  $V_{load}$ ，(b)  $i_{grid}$ ，(c)  $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{solar}$ ，(f)  $i_{bat}$ ，(g)  $P_{bat}$ ，(h)  $V_{bat}$ ，(i)  $V_{dc\_bus}$ 。

## 2、模式七 $P_{solar} > P_{bat} + P_{load}$

當太陽能發電系統所提供之功率大於負載所需之功率且電池組之充電電壓或電流大於上限值時，此時直流-直流升壓式電能轉換器放棄 MPPT 之功能，而進入限功率模式，以減少太陽能發電系統之輸出功率，以限制電池組之充電電流或電壓。在此模式下，

具電池儲能之太陽能發電系統之功率潮流如圖 50 所示，假設交流負載為 600W，太陽能板所受照度為 850W/m<sup>2</sup>，溫度為攝氏 55 度，太陽能發電之最大輸出功率為 1.5KW。

圖 54 為模式七下具電池儲能之獨立型太陽能發電電能轉換介面之模擬結果。圖 54 (a)  $V_{load}$  為負載端電壓、圖 54 (b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 54 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 54 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 54 (e)  $i_{solar}$  為太陽能輸出電流、圖 54 (f)  $i_{bat}$  為電池端電流、圖 54 (g)  $P_{bat}$  為電池端功率、圖 54 (h)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 54 (i)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出在 2.28 秒時電池充飽電(設定電壓 270V)，太陽能發電產生之功率超過負載消耗之功率，直流匯流排電壓由 405V 上升至 410V，此時太陽能發電放棄 MPPT 運轉改為限功率運轉，穩壓方式為當直流匯流排電壓大於 410V 時減少太陽能之直流-直流電能轉換器之責任週期以降低太陽能輸出功率，當直流匯流排電壓低於 410V 時增加太陽能之直流-直流電能轉換器責任週期用以增加太陽能輸出功率，以上動作重複至太陽能輸出功率、負載消耗之功率與電池充電吸收之功率間達到功率平衡。

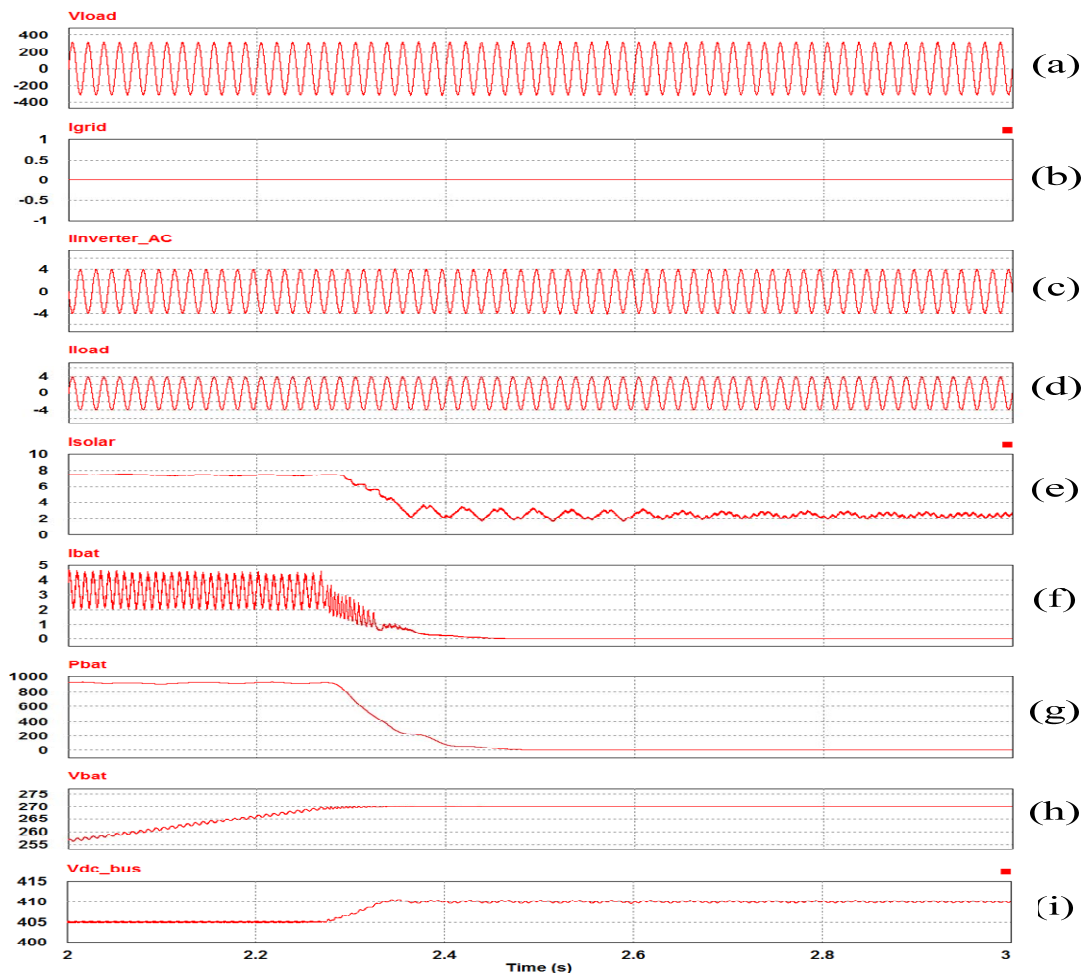


圖 54 模式七下具電池儲能之獨立型太陽能發電電能轉換介面之獨立  
 運轉模擬結果，(a)  $V_{load}$ ，(b)  $i_{grid}$ ，(c)  $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{solar}$ ，(f)  $i_{bat}$ ，  
 (g)  $P_{bat}$ ，(h)  $V_{bat}$ ，(i)  $V_{dc\_bus}$ 。

### 3、模式八 $P_{load} > P_{solar}$

當太陽能發電產生之功率  $P_{solar}$  小於負載消耗之功率  $P_{load}$  時，  
 此時由電池提供功率  $P_{bat}$ ，具電池儲能之太陽能發電系統之功率潮

流如圖 51 所示。假設交流負載為 2KW 卸載後為 1KW，太陽能板所受照度為 850W/m<sup>2</sup>，溫度為攝氏 55 度，太陽能發電機之最大輸出功率為 1.5KW。

圖 55 為模式八下具電池儲能之獨立型太陽能發電電能轉換介面之模擬結果。圖 55 (a)  $V_{load}$  為負載端電壓、圖 55 (b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 55 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 55 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 55 (e)  $i_{solar}$  為太陽能輸出電流、圖 55 (f)  $i_{bat}$  為電池端電流、圖 55 (g)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 55 (h)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出在 1.8 秒至 2.28 秒期間由連接電池組之雙向直流-直流轉換器來穩定直流匯流排電壓，電池組與太陽能發電共同提供負載消耗之電能，當 2.28 秒之後電池因放電至保護電壓 200V，電池停止放電，由於太陽能所產生之電能不足負載所需之電能，直流匯流排電壓會往下降至 395V 時，此時必須進行卸載(負載由 2KW 降為 1KW)，假設卸載後負載消耗之電能小於太陽能發電產生之電能，直流匯流排會持續上升到達 405V 時，此時電池未充飽(設定 270V 電壓)，其穩壓方式為直流匯流排電壓大於 405V 時開啟電池充電模式，太陽能發電產生之功率超過負載消耗之功率對電池充電，直流匯流排電壓下降至低於 405V 時關閉



電池充電模式，當電池充電模式，負載消耗之剩餘功率使直流匯流排電壓很快上升至 405V，以上動作重複至太陽能輸出功率、負載消耗之功率與電池充電吸收之功率間達到功率平衡，並由模式八跳回至模式六，電池開始充電。

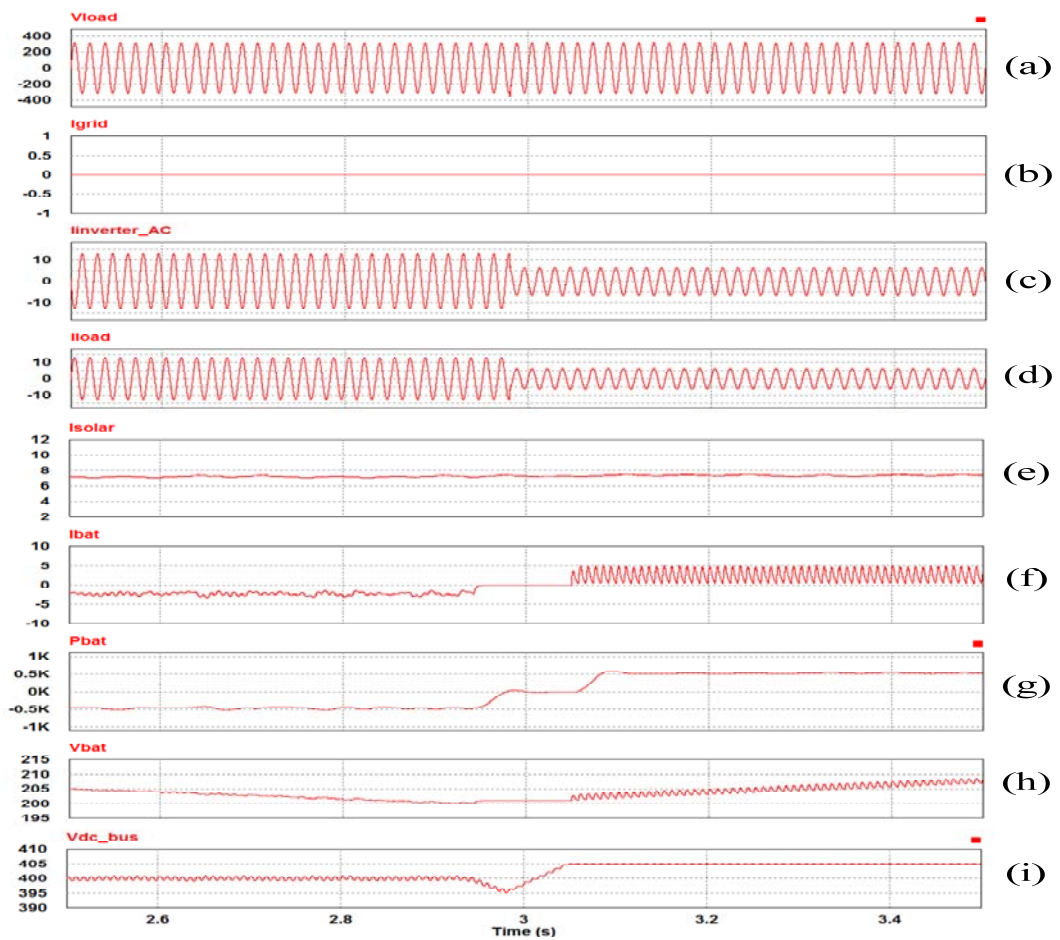


圖 55 模式八下具電池儲能之獨立型太陽能發電電能轉換介面之獨立運轉模擬結果，(a)  $V_{load}$ ，(b)  $i_{grid}$ ，(c)  $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{solar}$ ，(f)  $i_{bat}$ ，(g)  $P_{bat}$ ，(h)  $V_{bat}$ ，(i)  $V_{dc\_bus}$ 。

## (五)、電池充放電之電能轉換介面

依市電正常與否，電池儲能之電能轉換介面可分為市電併聯運轉與獨立運轉等兩種工作方式。

### 1、市電併聯運轉

當市電正常時，電池儲能之併網型電能轉換介面經由線路開關與市電併聯運轉，在此情況下，具電池儲能之併網型電能轉換介面依據電池組之充/放電狀態，可區分為四種工作模式，如圖 56 至圖 59 所示。電池組充電時有一種工作模式為模式一，而電池組放電時有模式二與模式三與模式四。當市電正常時，電池之定電流充電電流為 15A(100AH 電池之 0.15C )，定電壓充電之電壓為 270V(13.5V/顆\*20 顆)，而電池之定功率放電功率為 1KW。

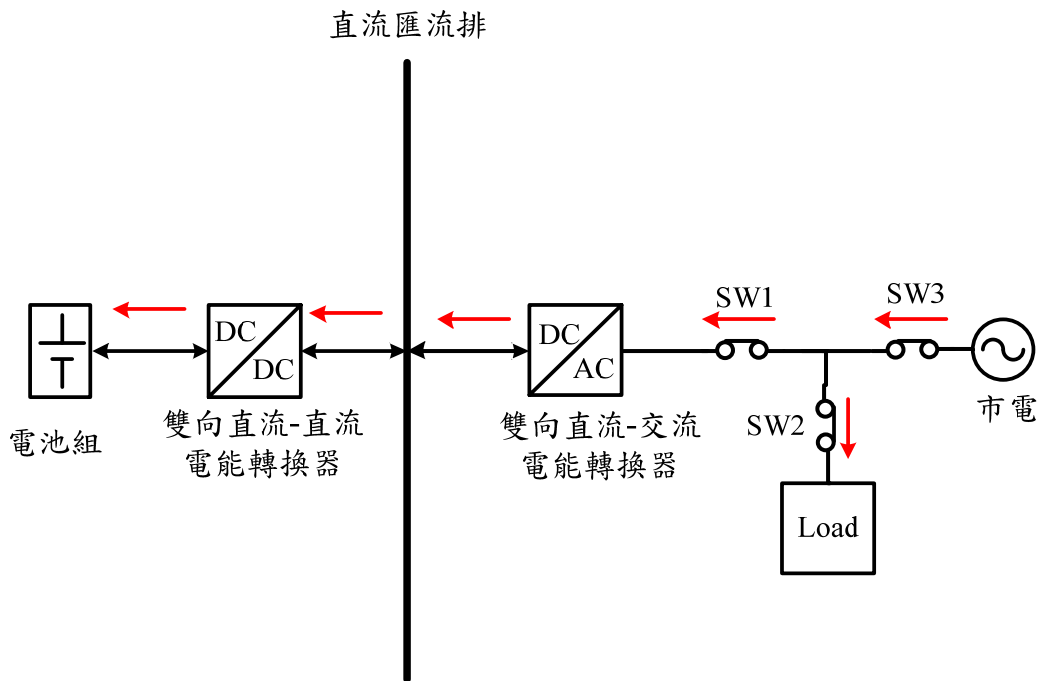


圖 56 電池儲能之併網型電能轉換介面模式一。

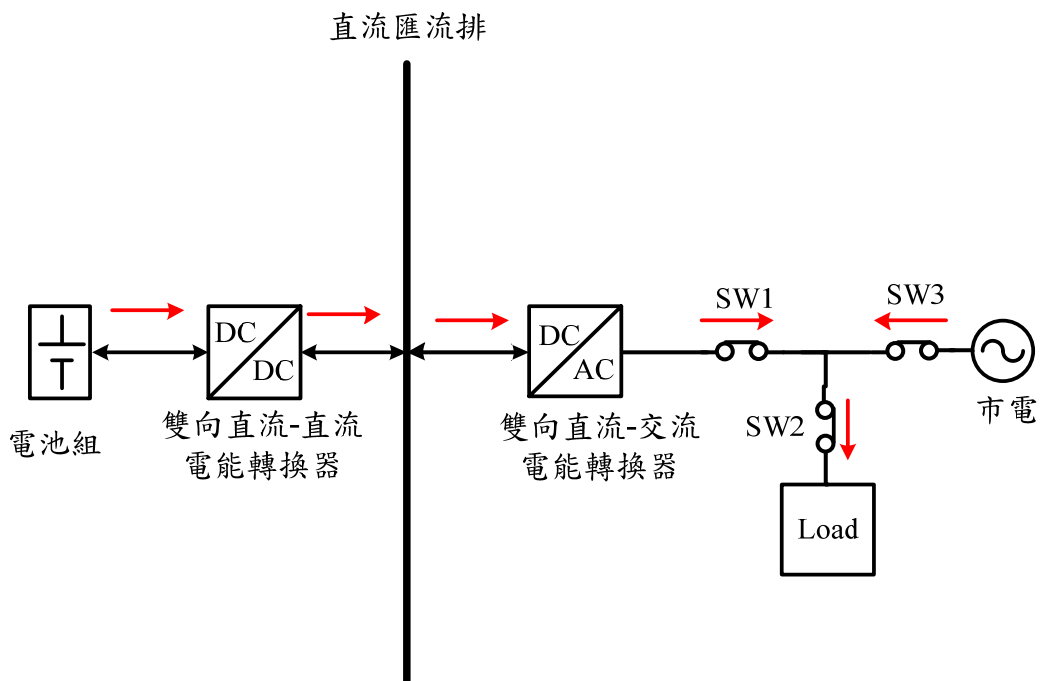


圖 57 電池儲能之併網型電能轉換介面模式二。

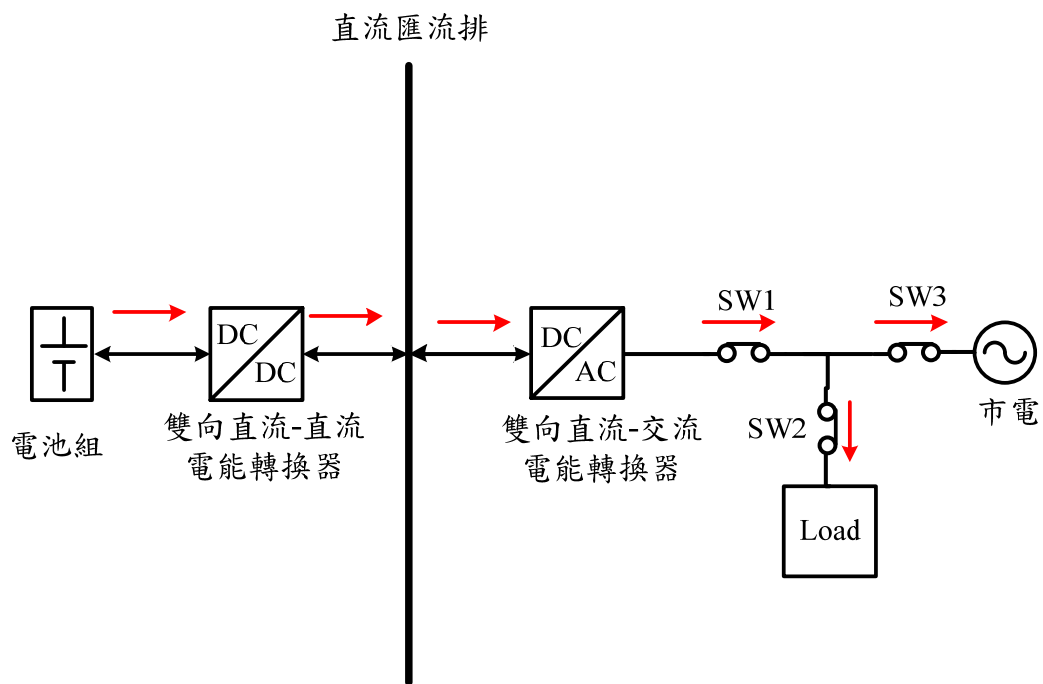


圖 58 電池儲能之併網型電能轉換介面模式三。

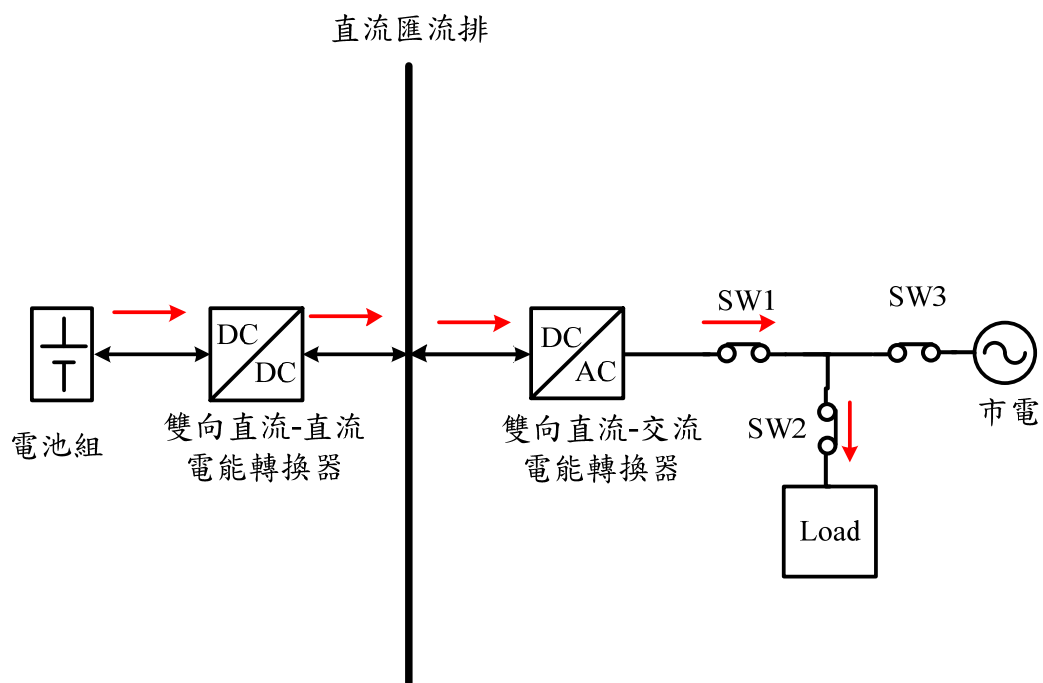


圖 59 電池儲能之併網型電能轉換介面模式四。

(1)、模式一：無放電需求，進入充電模式

當無放電需求下，市電提供電能給負載與對電池充電，其功率潮流如圖 56 所示，假設負載為 1.5KW，電池以 15A 之定電流及 270V 之定電壓對電池充電。

圖 60 為模式一下具電池儲能之併網型電能轉換介面之模擬結果。圖 60 (a)  $V_{in}$  為市電端電壓、圖 60(b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 60 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 60 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 60(e)  $i_{bat}$  為電池端電流、圖 60(f)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 60 (g)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出 2.5 秒~3.48 秒間對電池進行 CC 充電，而於 3.48 秒時達到電池之轉態電壓 270，此時開始以 270V 對電池進行定電壓充電，由於定電壓充電，電池之充電電流隨之減少。

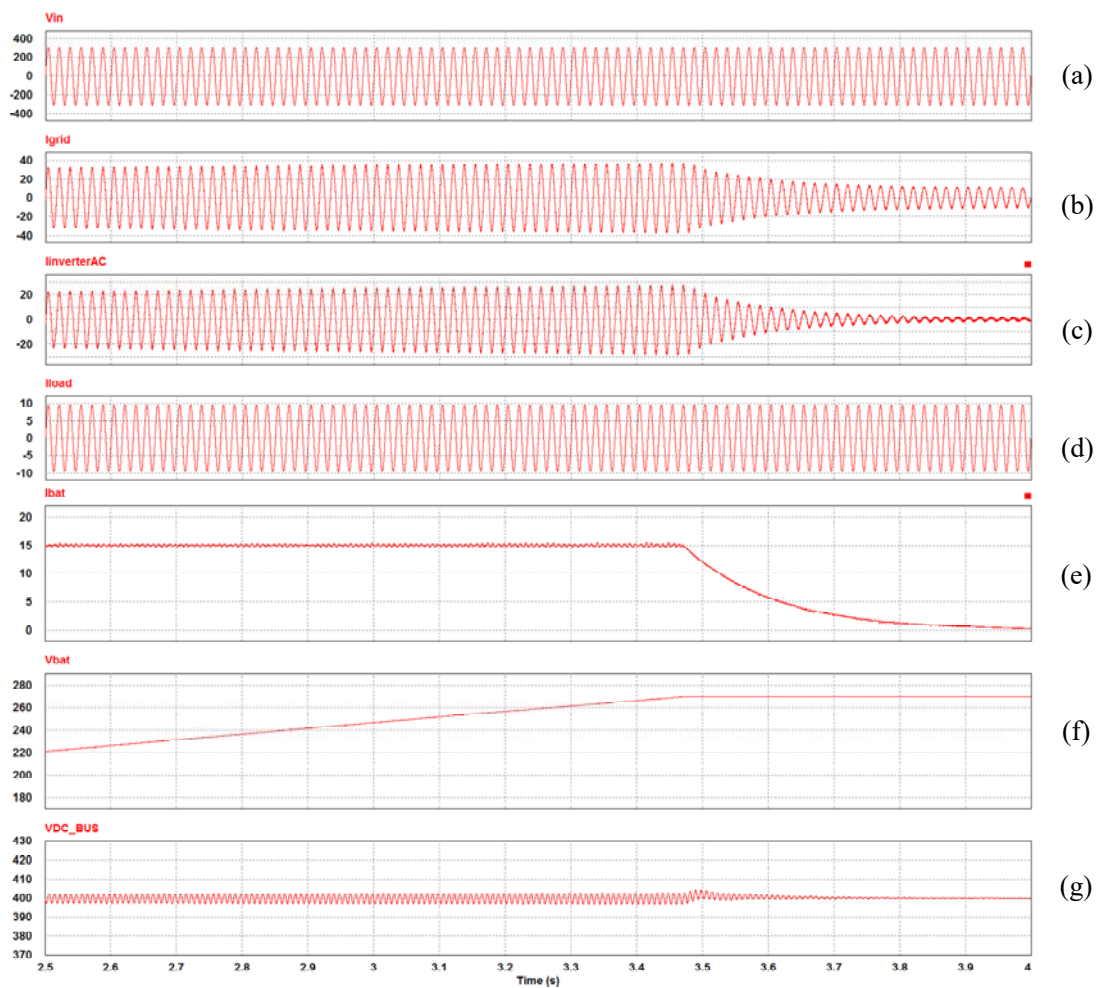


圖 60 模式一下電池儲能之併網型電能轉換介面之模擬結果，(a) $V_{in}$ ，  
 (b) $i_{grid}$ ，(c) $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{bat}$ ，(f) $V_{bat}$ ，(g) $V_{dc\_bus}$ 。

(2)、模式二：有放電需求，且  $P_{bat} < P_{load}$

當有放電需求且電池之放電功率小於負載所需功率之狀態下，  
 市電與電池之共同提供電能給負載，其功率潮流如圖 57 所示，假  
 設負載為 3KW，電池以 2KW 之定功率放電。

圖 61 為模式二下電池儲能之併網型電能轉換介面之模擬結果。

圖 61 (a)  $V_{in}$  為市電端電壓、圖 61(b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 61 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 61 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 61(e)  $P_{bat}$  為電池端功率、圖 61(f)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 61 (g)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出 3 秒~3.67 秒間電池組以 2KW 之定功率放電與市電共同提供電能給負載，而於 3.67 秒時達到電池之保護電壓 200V，此時關閉電池放電模式。

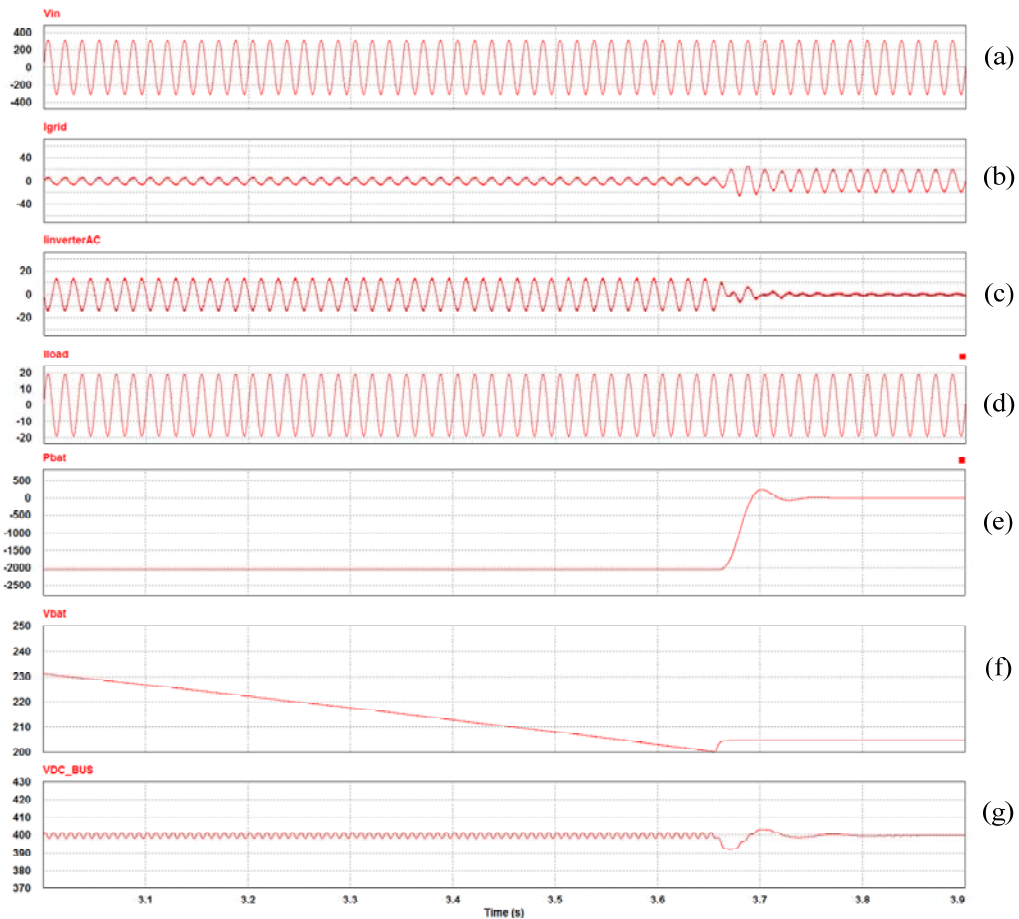


圖 61 模式二下電池儲能之併網型電能轉換介面之模擬結果，(a) $V_{in}$ ，(b) $i_{grid}$ ，(c) $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $P_{bat}$ ，(f) $V_{bat}$ ，(g) $V_{dc\_bus}$ 。

(3)、模式三: 有放電需求, 且  $P_{bat} > P_{load}$

當有放電需求且電池之放電功率大於負載所需功率之狀態下, 電池提供負載所需之電能, 並將多餘之電能饋入市電, 因此其功率潮流如圖 58 所示, 假設負載為 500W, 電池以 2KW 之定功率放電。

圖 62 為模式三下電池儲能之併網型電能轉換介面之模擬結果。圖 62 (a)  $V_{in}$  為市電端電壓、圖 62(b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 62 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 62 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 62(e)  $P_{bat}$  為電池端功率、圖 62(f)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 62(g)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出 3 秒~3.67 秒間電池組以 2KW 之定功率放電除提供給負載外, 並將多餘之電能回饋入市電, 而於 3.67 秒時達到電池之保護電壓 200V, 此時關閉電池放電模式。



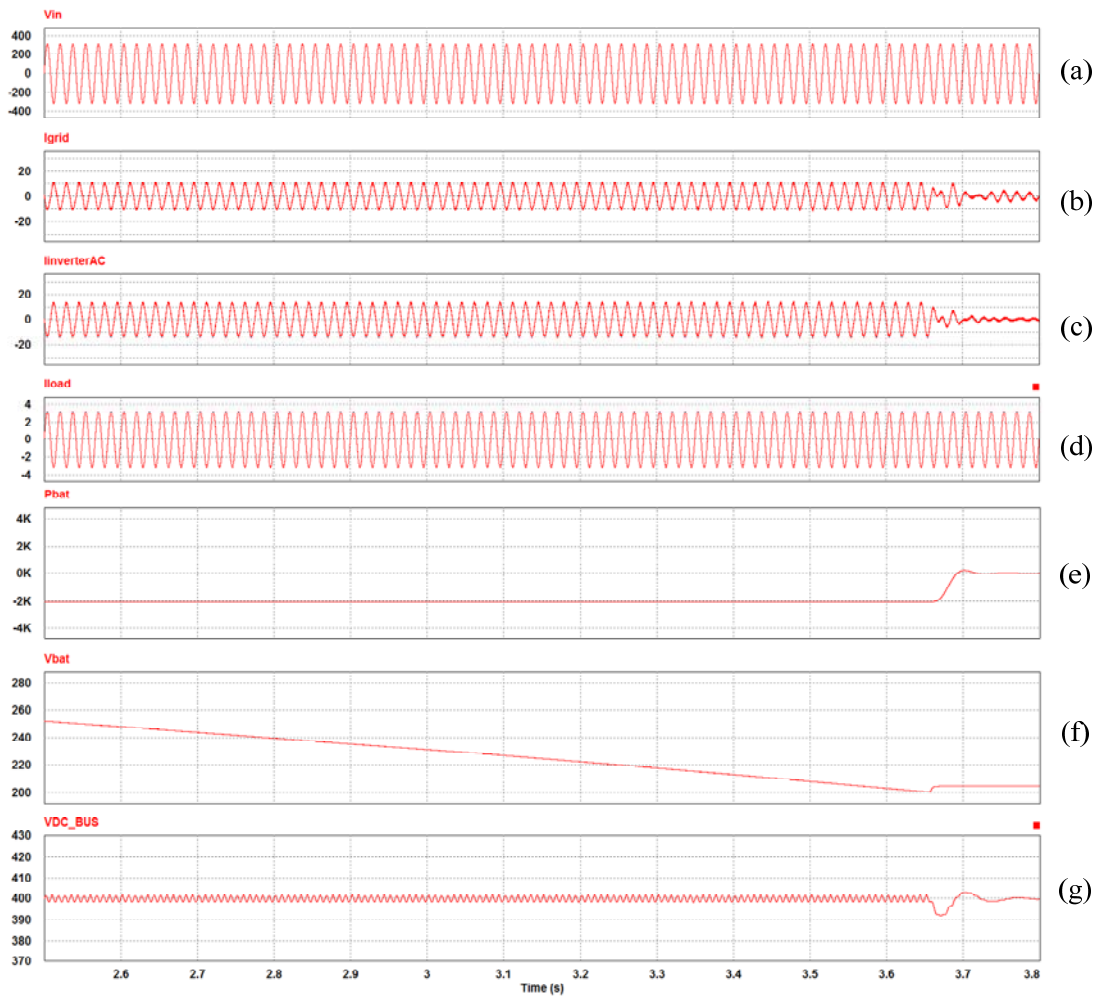


圖 62 模式三下電池儲能之電併網型能轉換介面之模擬結果，(a) $V_{in}$ ，  
 (b) $i_{grid}$ ，(c) $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $P_{bat}$ ，(f) $V_{bat}$ ，(g) $V_{dc\_bus}$ 。

#### (4)、模式四：有放電需求，且 $P_{bat}=P_{load}$

當有放電需求且電池之放電功率等於負載所需功率之狀態下，  
 電池提供負載所需之電能，因此其功率潮流如圖 59 所示，假設負  
 載為 2000W，電池以 2KW 之定功率放電。

圖 63 為模式四下電池儲能之併網型電能轉換介面之模擬結果。

圖 63 (a)  $V_{in}$  為市電端電壓、圖 63(b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 63 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 63 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 63(e)  $P_{bat}$  為電池端功率、圖 63(f)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 63(g)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出 3.55 秒前電池以 2KW 之定功率放電供給負載，由於電池釋放之功率等於負載消耗之功率，市電端提供之電能接近於 0，此時與負載連接之雙向直流-交流電能轉換器產生一擾動信號進行擾動，因擾動後，市電電流亦隨之變動，判定市電正常，所以雙向直流-交流電能轉換器持續投入擾動信號，直到 3.55 秒後電池放電至保護電壓 200V，此時關閉電池放電模式，市電開始提供電能。

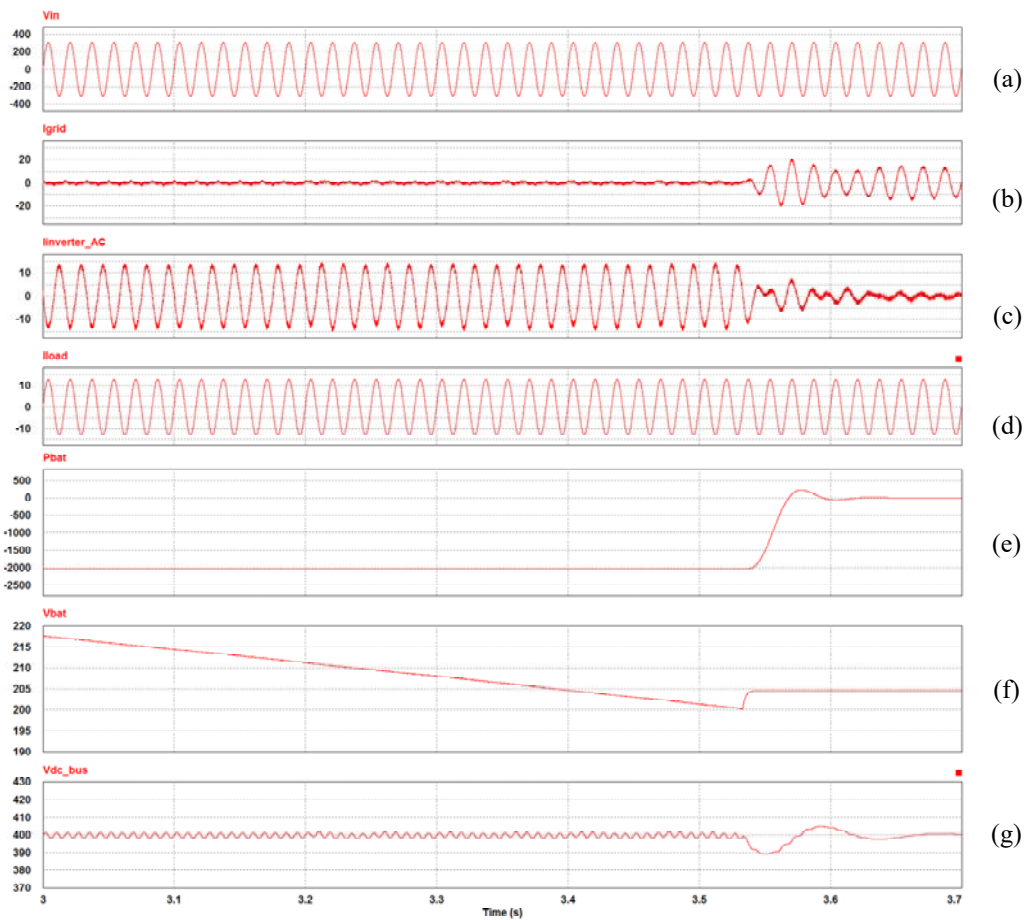


圖 63 模式四下電池儲能之電併網型能轉換介面之模擬結果，(a) $V_{in}$ ，  
(b) $i_{grid}$ ，(c) $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $P_{bat}$ ，(f) $V_{bat}$ ，(g) $V_{dc\_bus}$ 。

## 2、獨立運轉

當市電斷電時，電池儲能之獨立型電能轉換介面經由線路開關打開使系統切離市電，在此情況下，電池儲能之獨立型電能轉換介面形成一不斷電電源供應器介面如圖 64 所示。當獨立運轉時由電池對直流匯流排進行穩壓，再經雙向直流-交流電能轉換介面將電能提供交流負載。

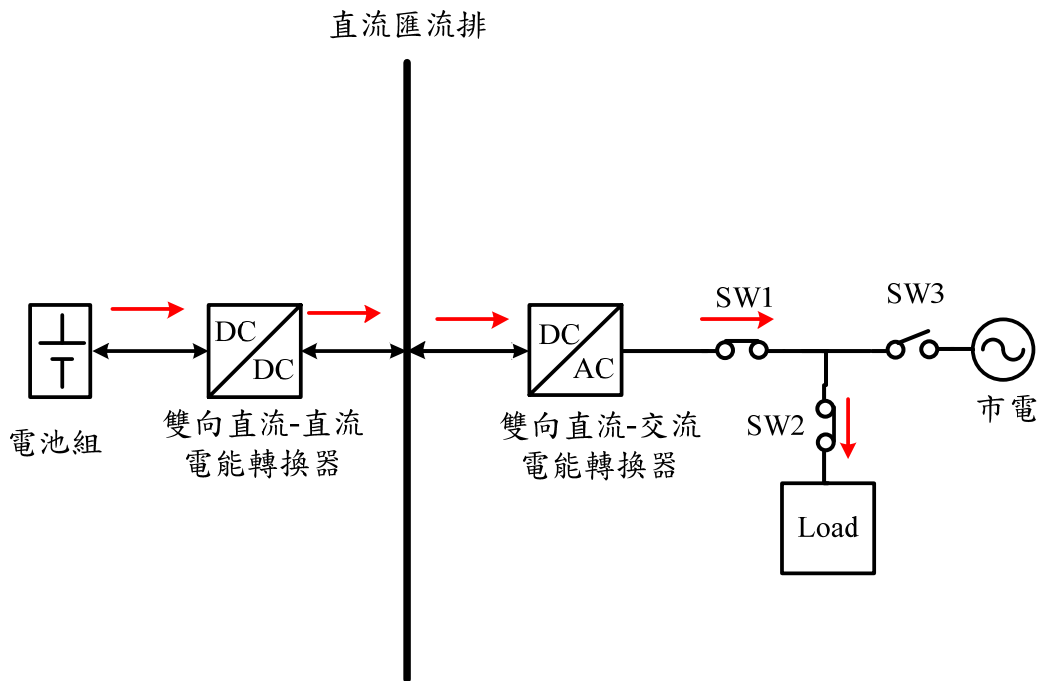


圖 64 電池儲能之獨立型電能轉換介面。

圖 65 為電池儲能獨立運轉時電能轉換介面於交流負載為 1KW 之模擬結果。圖 65(a)  $V_{load}$  為負載端電壓、圖 65 (b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 65 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 65 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 65 (e)  $P_{bat}$  為電池端功率、圖 65(f)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 65(g)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出 1 秒時市電中斷，直流匯流排電壓由電池組來穩壓，而雙向直流-交流電能轉換器在 3 個週期內交流端電壓達到恢復，供應負載所需之電能。

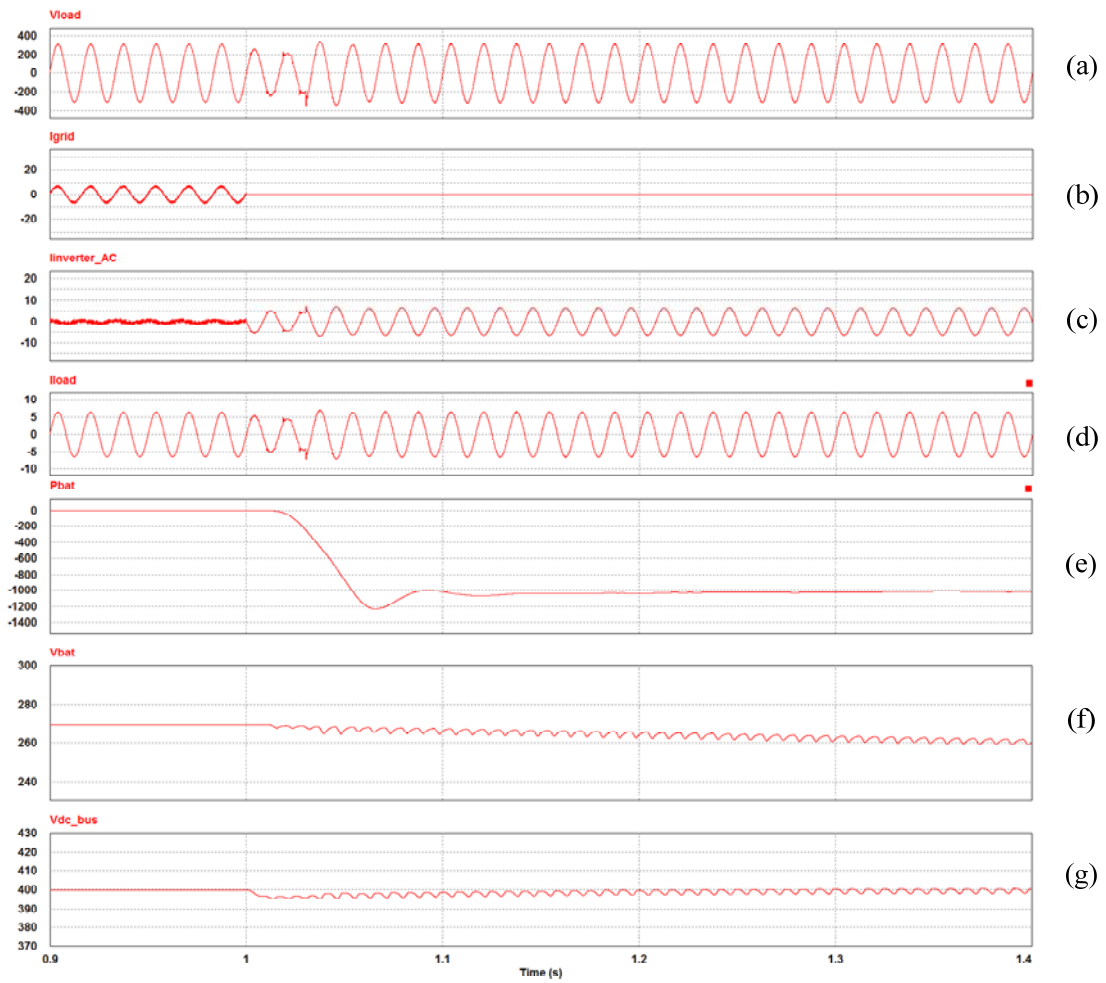


圖 65 下電池儲能之獨立運轉時電能轉換介面於交流負載為 1KW 之  
 模擬結果，(a)  $V_{load}$ ，(b)  $i_{grid}$ ，(c)  $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $P_{bat}$ ，(f)  $V_{bat}$ ，  
 (g)  $V_{dc\_bus}$ 。

## (六)、整合風光電發電系統之併網型直流耦合式電能轉換介面

依市電正常與否，整合風光電之發電系統之直流耦合式電能轉換介面可分為市電併聯運轉與獨立運轉兩種工作方式。圖 66 及圖 67 為整合風力、太陽能與電池儲能發電系統之直流耦合式電能轉換介面在併網及獨立運轉之流程圖。

由圖 66 可看出系統一開始會執行獨立運轉控制偵測，其係經由偵測市電電流來判斷市電是否有異常，如果市電電流為零時表示市電異常，則系統進入獨立運轉模式，若市電電流不為零時，表示市電正常，系統執行併網雙向直流-交流電能轉換控制；當市電正常時，會先偵測電池組電壓，之後判斷電池是否大於電池過放保護電壓 200V，如大於電池過放保護電壓 200V，先判斷使用者是否需要電池放電，如果電池不需要放電，會執行充電模式；如果電池需要放電，會執行定功率放電，在放電模式中，藉由判斷風力、太陽能及電池組釋放至雙向直流-交流電能轉換器交流端之功率是否有大於負載消耗功率之功率潮流，可歸納出風力、太陽能及電池組之輸出功率總和小於負載消耗功率之模式四，及風力、太陽能及電池組之輸出功率總和大於負載消耗功率之模式五；當判斷電池之電壓小於電池保護電壓 200V 時，會執行充電模式並以定電流/定電壓充電方式對電池組進行充電，藉由判斷風力及太陽能功率總和是否大於電池組充電所需功率之功率潮流，如風力及太陽能功率總和小於電池組充電所需功率操作在模式一；如風力及太陽能功率總和大於電池組充電所需功率，接著藉由判斷風力及太陽能功率總和是否大於電池組及負載所需功率，可歸納出分別為風力及太陽能功率總和小於電池組及負載所需功率之模式二，以及風力及太陽能功率總和大

於電池組及負載所需功率之模式三。

由圖 67 可看出當系統進入獨立運轉模式，會偵測直流匯流排電壓，判斷直流匯流排電壓是否大於電池充電電壓設定值 403V，如直流匯流排電壓小於電池充電電壓 403V，開啟電池組穩壓模式，將直流匯流排穩壓至 400V 為模式十之功率潮流；再偵測直流匯流排電壓，判斷直流匯流排電壓是否低於卸載設定值 395V，如果高於卸載設定值 395V 繼續執行模式十；如果低於卸載設定值 395V 則進入模式十一之功率潮流進行卸載；如直流匯流排電壓大於電池充電電壓 403V，開啟電池充電模式，並將直流匯流排穩壓至 403V 進入模式六之功率潮流；接著偵測判斷直流匯流排電壓是否大於太陽能限功率設定值 406V，如果低於太陽能限功率設定值 406V 繼續執行模式六；如果大於太陽能限功率設定值 406V，限制太陽能發電功率並進入模式七之功率潮流，並將直流匯流排穩壓至太陽能限功率設定值 406V；接著偵測判斷直流匯流排電壓是否大於風力限功率設定值 413V，如果低於風力限功率設定值 413V 繼續執行模式七；如果大於風力限功率設定值 413V，限制風力發電功率並進入模式八之功率潮流並將直流匯流排穩壓至風力限功率設定值 413V；接著偵測判斷直流匯流排電壓是否大於停止發電熱機狀態之設定值 417V，如果低於停止發電熱機狀態之設定值 417V 繼續執行模式八；如果大於停止發電熱機狀態之設定值 417V，將太陽能發電之直流-直流電能轉換器、風力發電之交流-直流電能轉換器和電池組之雙向直流-直流電能轉換器操作在停止發電之熱機狀態，此時為為模式九，維持模式九期間持續偵測直流匯流排電壓，如電壓小於 413V 將重新啟動風力發電之交流-直流電能轉換器來提供電

路損耗功率，並穩壓至 413V。

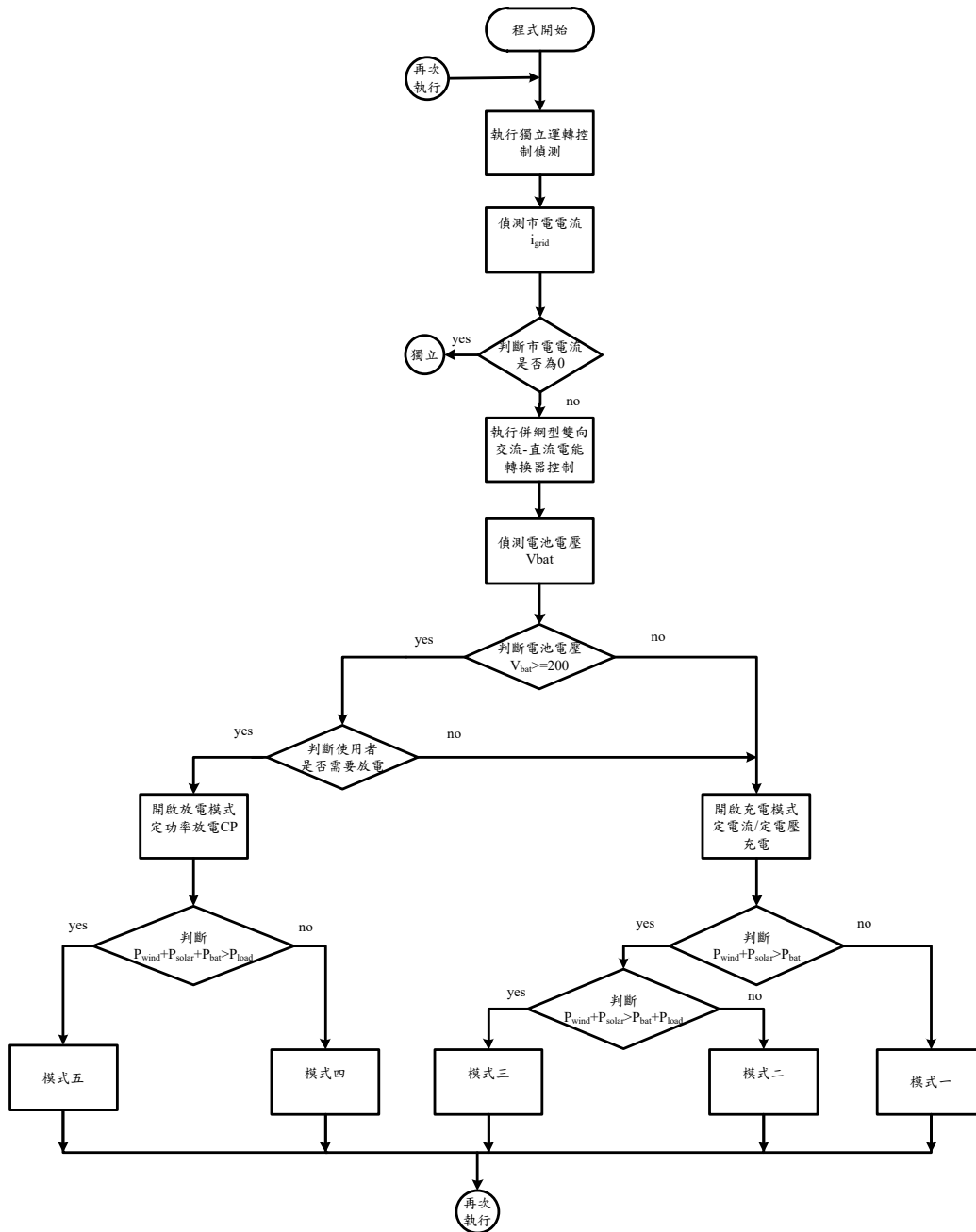


圖 66 為整合風力、太陽能與電池儲能發電系統之直流耦合式電能轉換介面於併網運轉之流程圖。



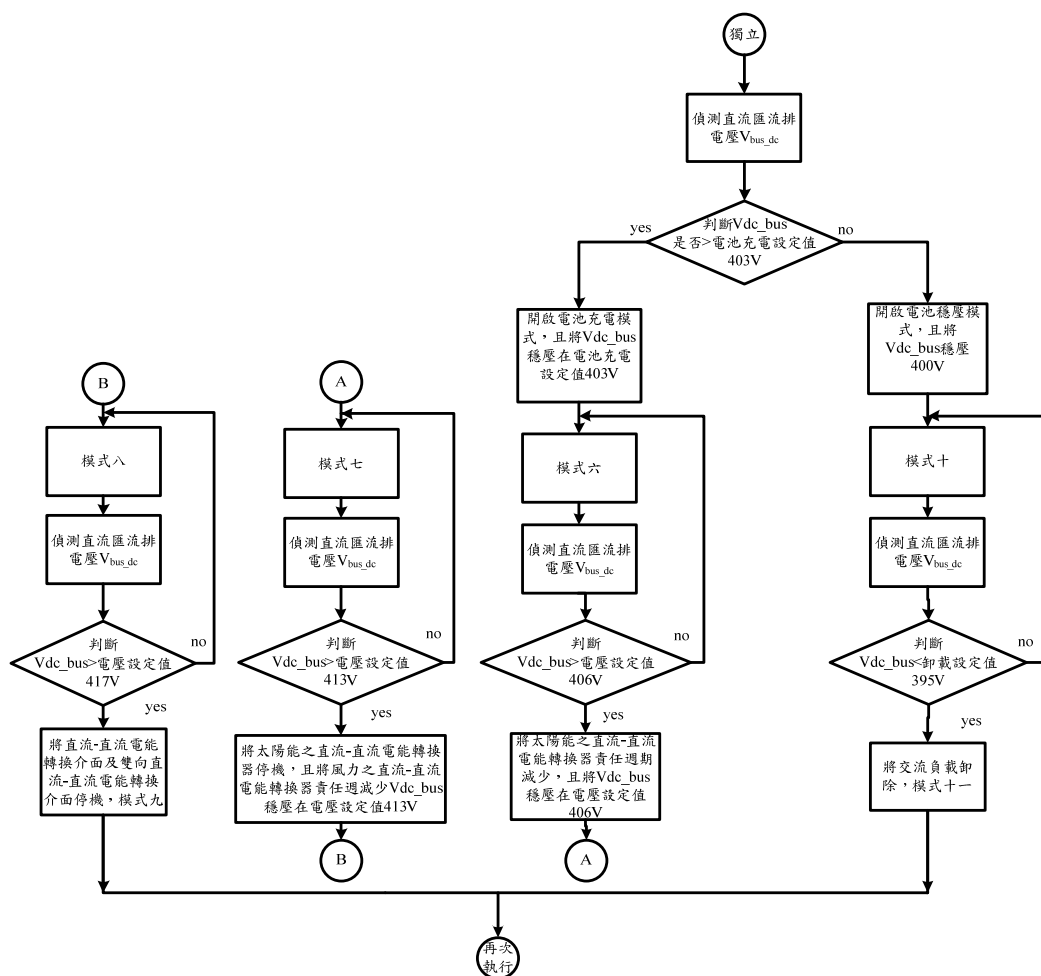


圖 67 整合風力、太陽能與電池儲能發電系統之直流耦合式電能轉換介面於獨立運轉之流程圖。

當市電正常時，整合風光電發電系統之直流耦合式併網型電能轉換介面經由線路開關與市電併聯運轉，在此情況下，具整合風光電發電系統之直流耦合式併網型電能轉換介面依據電池組之充/放電狀態，可區分為五種工作模式，如圖 68 至圖 72 所示。在電池組充電時有三種工作模式分別為模式一、模式二及模式三，在電池組放電時亦有兩種工作模式分別為模式四及模式五。當市電正常時，

連接小型風力與太陽能之電能轉換器皆隨時執行 MPPT 功能；  
 而電池之定電流充電電流為 15A(100AH 電池之 0.15C )，而定電  
 壓充電之電壓為 270V(13.5V/顆\*20 顆) ，而電池之定功率放電功  
 率 2KW 。

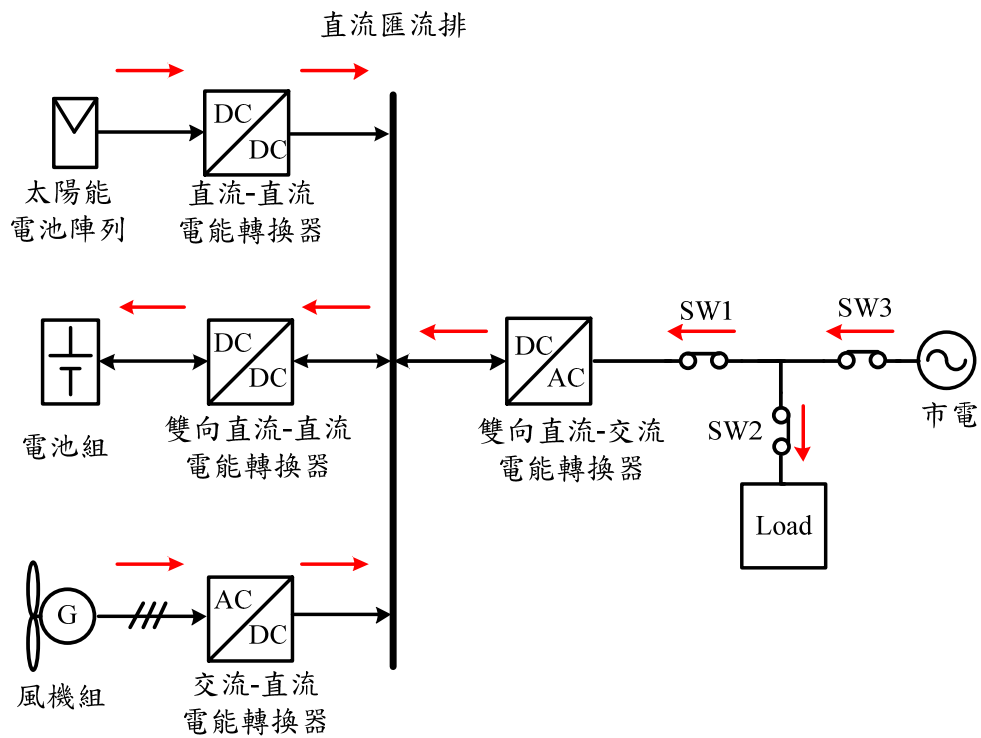


圖 68 整合風光電發電系統之併網型直流耦合式電能轉換介面模式

一。

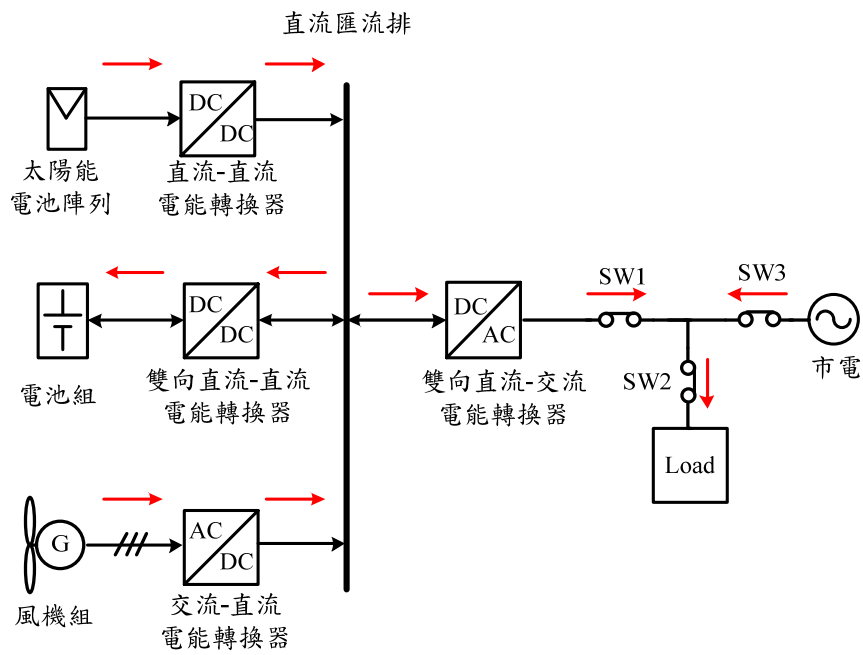


圖 69 整合風光電發電系統之併網型直流耦合式電能轉換介面模式

二。

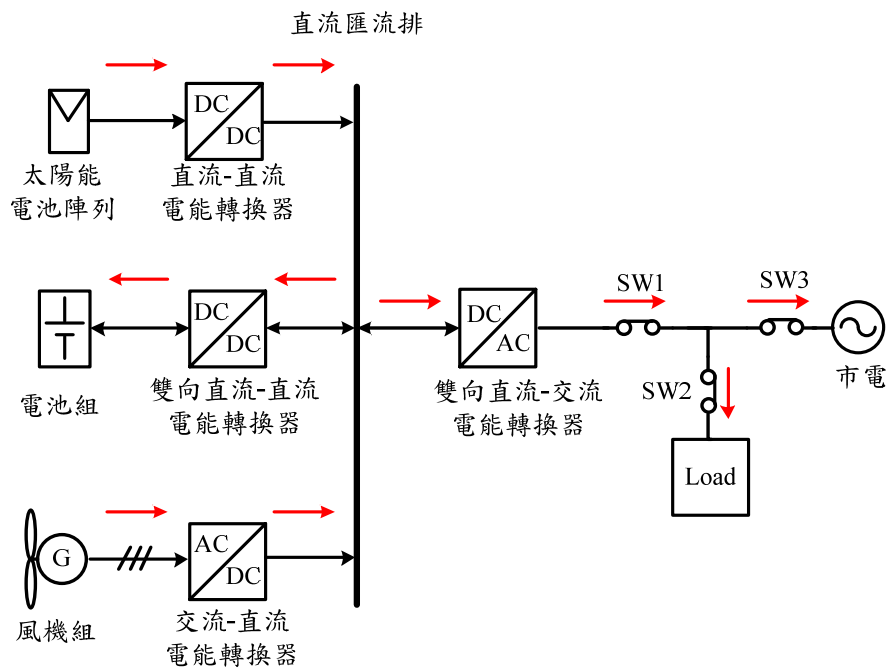


圖 70 整合風光電發電系統之併網型直流耦合式電能轉換介面模式

三。

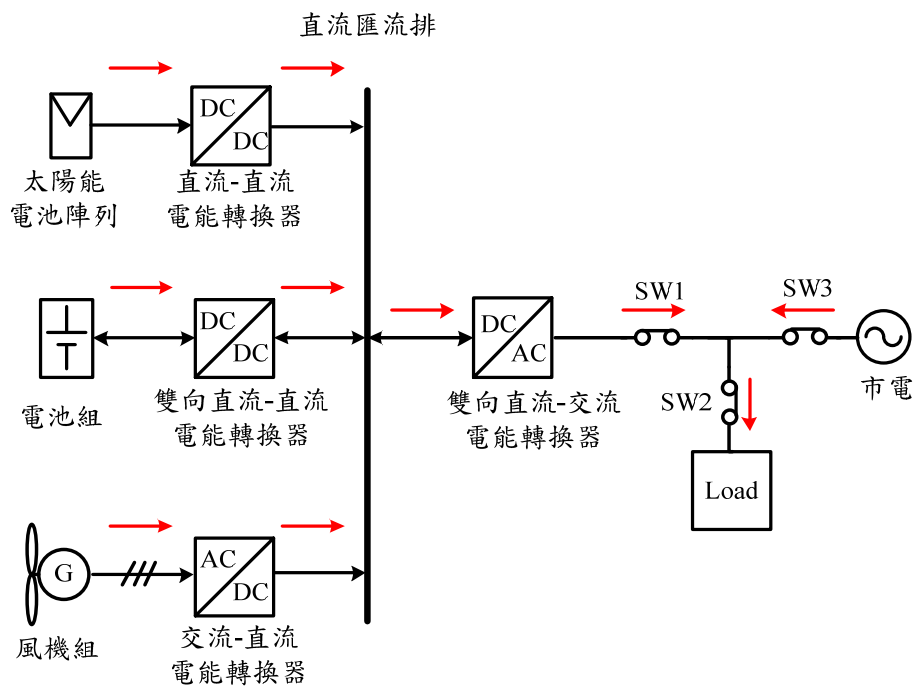


圖 71 整合風光電發電系統之併網型直流耦合式電能轉換介面模式

四。

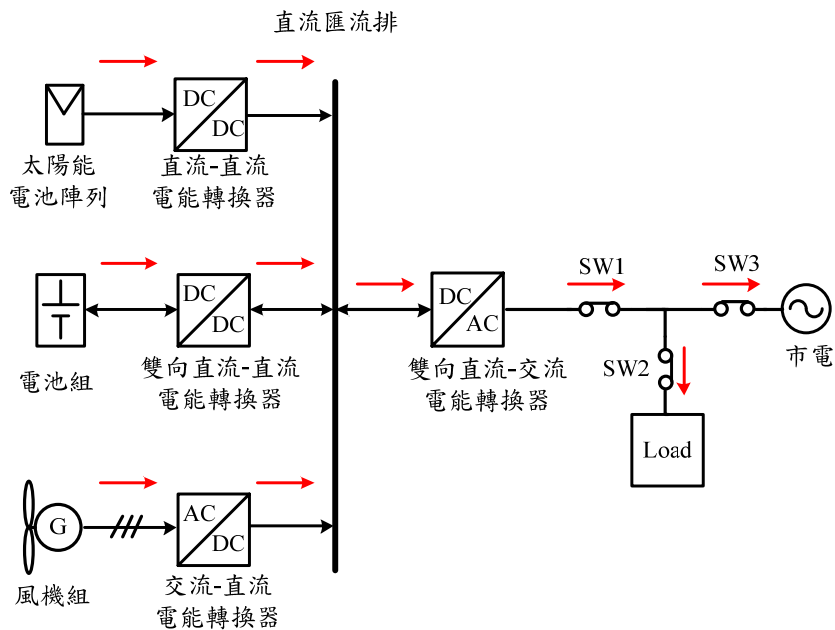


圖 72 整合風光電發電系統之併網型直流耦合式電能轉換介面模式

五。

## 1、模式一： $P_{\text{wind}} + P_{\text{solar}} < P_{\text{bat}}$

當電池尚未充飽電之狀態下，風力發電與太陽能發電產生之電能優先對電池充電，而不注入市電或提供給負載，因此其功率潮流如圖 68 所示。假設此時負載為 3KW，風力發電機之最大輸出功率為 1KW 太陽能最大輸出功率為 1.5KW。

圖 73 為模式一下整合風光電發電系統之併網型直流耦合式電能轉換介面穩態之模擬結果。圖 73 (a)  $V_{\text{in}}$  為市電端電壓、圖 73(b)  $i_{\text{grid}}$  為市電端電流、圖 73 (c)  $i_{\text{inverter\_AC}}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 73 (d)  $i_{\text{load}}$  為負載端電流、圖 73 (e)  $i_{\text{Rwind\_AC}}$  為風力端 R 相電流、圖 73(f)  $i_{\text{solar}}$  為太陽能輸出電流、圖 73(g)  $i_{\text{bat}}$  為電池端電流、圖 73 (h)  $V_{\text{bat}}$  為電池端電壓、圖 73(i)  $V_{\text{dc\_bus}}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出 2.4 秒~3.4 秒間市電供應電能給負載，且風力發電及太陽能發電進行 MPPT 與市電共同以 15A 之定電流對電池充電，所以系統進入模式一，電池充電電壓隨著充電時間而提高，並達到系統之功率平衡。

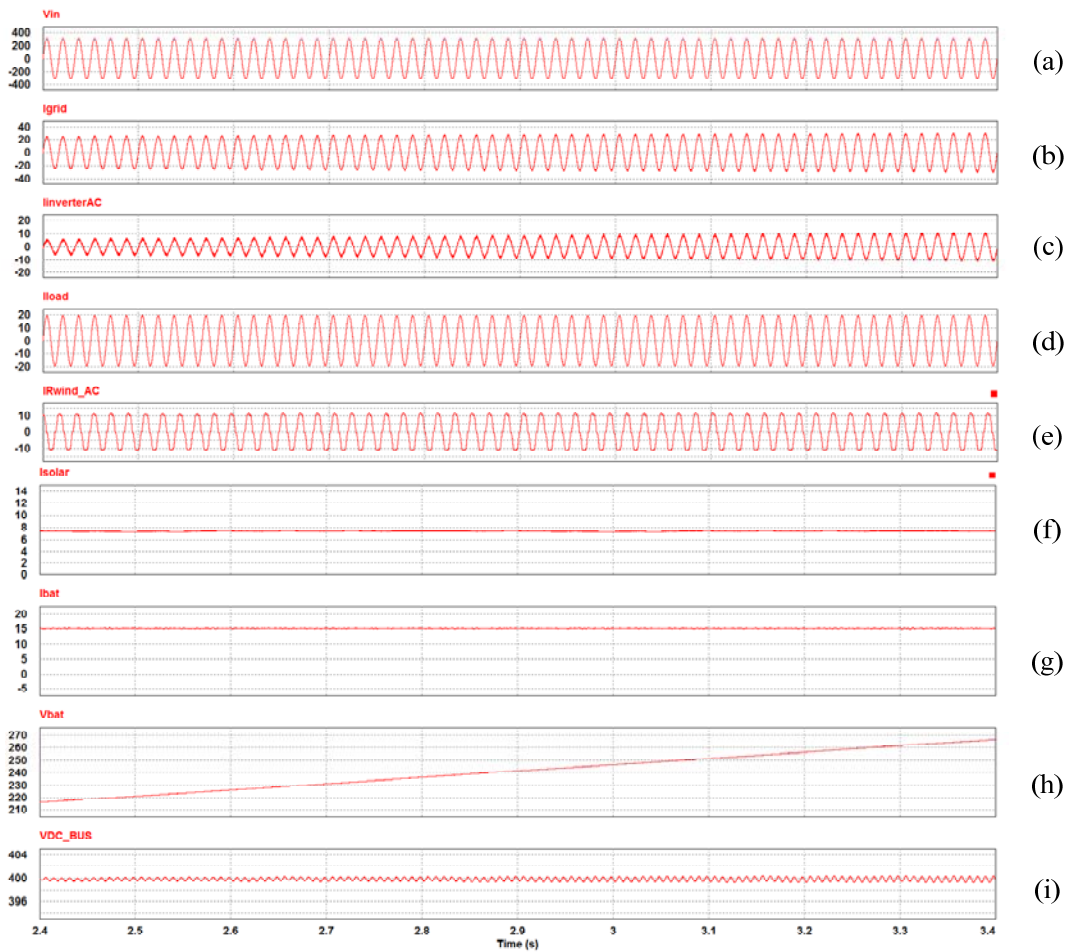


圖 73 模式一下整合風光電發電系統之併網型直流耦合式電能轉換

介面穩態之模擬結果，(a) $V_{in}$ ，(b) $i_{grid}$ ，(c) $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{Rwind\_AC}$ ，(f) $i_{solar}$ ，(g) $i_{bat}$ ，(h) $V_{bat}$ ，(i) $V_{dc\_bus}$ 。

## 2、模式二: $P_{bat}+P_{load}>P_{wind}+P_{solar}>P_{bat}$

當電池進入定電壓充電狀態下，風力發電與太陽能發電產生之電能優先對電池充電，而多餘的電能由與市電併聯之雙向直流-交流電能轉換器饋回交流端與市電共同供給負載，因此其功率潮流如圖 69 所示。假設此時負載為 5KW，風力發電機之最大輸出功率為

1KW 太陽能最大輸出功率為 1.5KW。

圖 74 為模式一轉成模式二之模擬結果下整合風光電發電系統之併網型直流耦合式電能轉換介面之模擬結果。圖 74 (a)  $V_{in}$  為市電端電壓、圖 74(b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 74 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 74 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 74 (e)  $i_{Rwind\_AC}$  為風力端 R 相電流、圖 74(f)  $i_{solar}$  為太陽能輸出電流、圖 74(g)  $i_{bat}$  為電池端電流、圖 74 (h)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 74(i)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出 3.47 秒前為模式一狀態以 15A 之定電流對電池充電，當 3.47 秒後電池組充至額定電壓 270V，充電狀態由定電流轉變成定電壓充電，對電池組之充電電流隨之減少，此時電池組之充電電能由風力發電、太陽能發電及市電共同提供逐步改由風力發電與太陽能發電提供，並將多餘的電能經雙向直流-交流電能轉換器轉換成交流電，由於交流負載設定為 5KW，而由風力發電與太陽能發電不足以供給負載，不足的負載電能由市電提供，此時系統進入模式二，並達到系統之功率平衡。

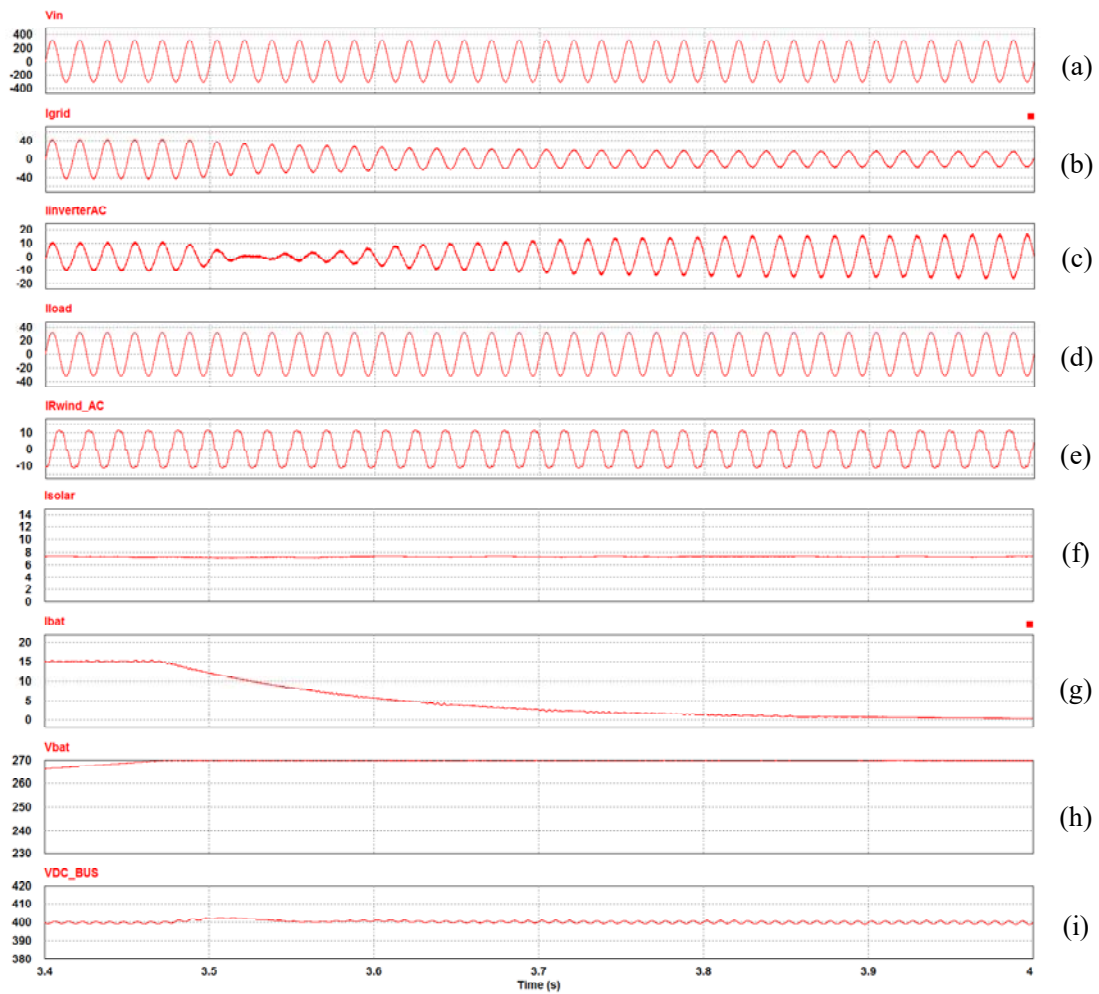


圖 74 整合風光電發電系統之併網型直流耦合式電能轉換介面由模式一轉成模式二之模擬結果，(a) $V_{in}$ ，(b) $i_{grid}$ ，(c) $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{Rwind\_AC}$ ，(f) $i_{solar}$ ，(g) $i_{bat}$ ，(h) $V_{bat}$ ，(i) $V_{dc\_bus}$ 。

### 3、模式三: $P_{bat}+P_{load} < P_{wind}+P_{solar}$

當電池進入定電壓充電狀態下，風力發電與太陽能發電產生之電能優先對電池充電，而多餘的電能由經雙向直流-交流電能轉換器轉換成交流電，除了供應負載外，並將多餘電能饋入市電，其功



率潮流如圖 70 所示。假設此時負載為 1KW，風力發電機之最大輸出功率為 1KW 太陽能最大輸出功率為 1.5KW。

圖 75 為模式一轉成模式三下整合風光電發電系統之併網型直流耦合式電能轉換介面之穩模擬結果。圖 75 (a)  $V_{in}$  為市電端電壓、圖 75(b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 75 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 75 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 75 (e)  $i_{Rwind\_AC}$  為風力端 R 相電流、圖 75(f)  $i_{solar}$  為太陽能輸出電流、圖 75(g)  $i_{bat}$  為電池端電流、圖 75 (h)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 75(i)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出 3.47 秒前為模式一狀態以 15A 之定電流對電池充電，當 3.47 秒後電池組充至額定電壓 270V，電池組之充電由定電流充電轉變成定電壓充電，對電池之充電電流隨之減少，此時電池定電壓之充電電能由風力發電與太陽能發電提供，並將多餘的電能經雙向直流-交流電能轉換器轉換成交流電供應給交流負載，而多餘之電能則饋入市電端。

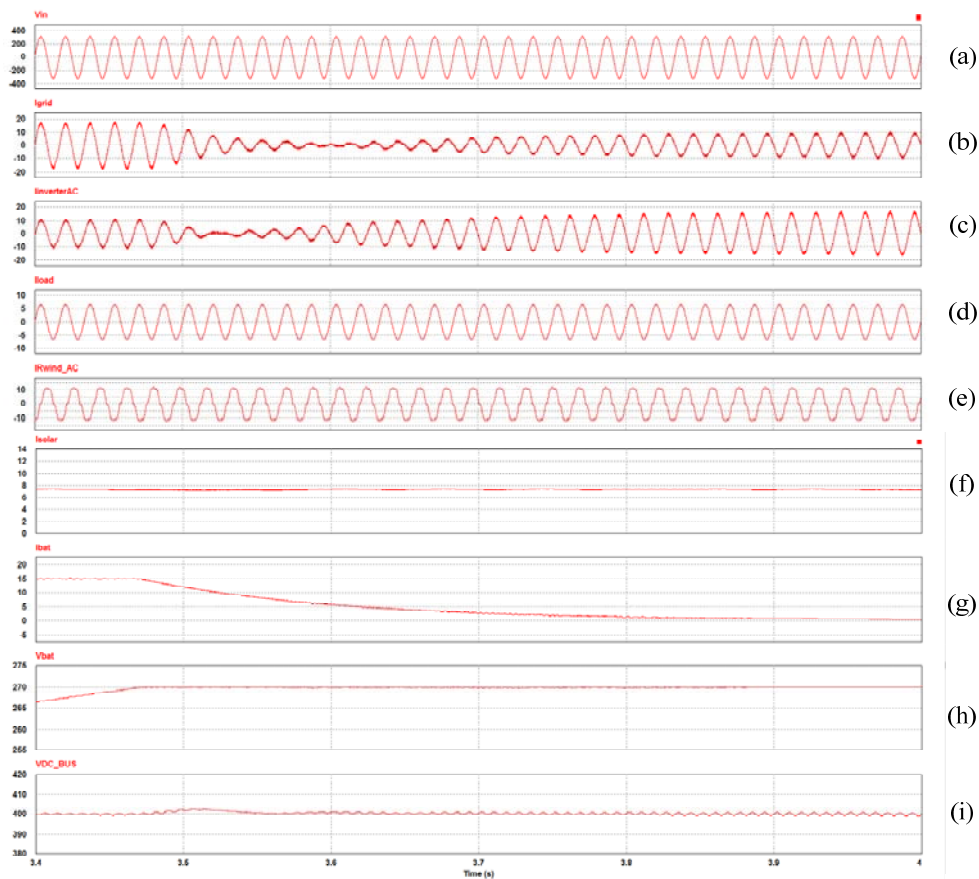


圖 75 整合風光電發電系統之併網型直流耦合式電能轉換介面由模式一轉成模式三介面之模擬結果，(a) $V_{in}$ ，(b) $i_{grid}$ ，(c) $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{Rwind\_AC}$ ，(f) $i_{solar}$ ，(g) $i_{bat}$ ，(h) $V_{bat}$ ，(i) $V_{dc\_bus}$ 。

#### 4、模式四: $P_{load} > P_{wind} + P_{solar} + P_{bat}$

當需要電池組放電時，電池組會釋放定功率來供給負載，當電池與風力發電及太陽能發電功率不足以供給負載時，由市電提供不足部分，其功率潮流如圖 71 所示。假設此時負載為 5KW，風力發電機之最大輸出功率為 1KW 太陽能最大輸出功率為 1.5KW，電池

定功率放電為 2KW。

圖 76 為模式四下整合風光電發電系統之併網型直流耦合式電能轉換介面之模擬結果。圖 76 (a)  $V_{in}$  為市電端電壓、圖 76(b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 76 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 76 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 76 (e)  $i_{Rwind\_AC}$  為風力端 R 相電流、圖 76(f)  $i_{solar}$  為太陽能輸出電流、圖 76(g)  $P_{bat}$  為電池端功率、圖 76 (h)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 76(i)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出 4.54 秒前為電池組以 2KW 之定功率放電，所以風力發電與太陽能發電以及電池組共同供給負載用電，由於負載設為 5KW，功率不足部分由市電來供給，此時系統進入模式四，最後當電池放電使電壓降至 200V 時，將電池組放電模式關閉，來保護電池防止過放，此時市電增加提供給負載之電能。

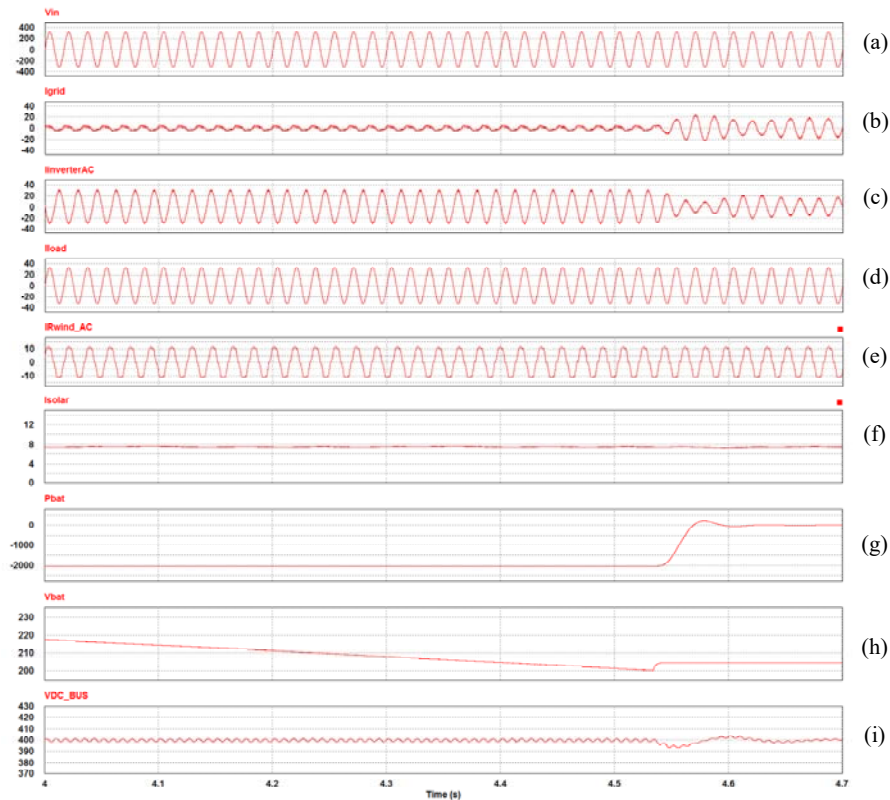


圖 76 模式四下整合風光電發電系統之併網型直流耦合式電能轉換介面之模擬結果，(a) $V_{in}$ ，(b) $i_{grid}$ ，(c) $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{Rwind\_AC}$ ，(f) $i_{solar}$ ，(g) $P_{bat}$ ，(h) $V_{bat}$ ，(i) $V_{dc\_bus}$ 。

### 5、模式五: $P_{load} < P_{wind} + P_{solar} + P_{bat}$

當需要電池組放電時，電池組會釋放定功率來供給負載，當電池與風力發電及太陽能發電功率足以供給負載時，多餘功率饋入市電端，其功率潮流如圖 72 所示。假設此時負載為 2KW，風力發電機之最大輸出功率為 1KW 太陽能最大輸出功率為 1.5KW，電池定功率放電為 2KW。

圖 77 為模式五下整合風光電發電系統之併網型直流耦合式電能轉換介面之模擬結果。圖 77 (a)  $V_{in}$  為市電端電壓、圖 77(b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 77 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 77 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 77 (e)  $i_{Rwind\_AC}$  為風力端 R 相電流、圖 77(f)  $i_{solar}$  為太陽能輸出電流、圖 77(g)  $P_{bat}$  為電池端功率、圖 77 (h)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 77(i)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出 4.54 秒前為電池組以 2KW 之定功率放電，所以風力發電與太陽能發電以及電池組共同供給負載用電，由於負載設為 2KW，多餘的功率會饋入市電端，此時系統進入模式五，當電池放電使電壓降至 200V 時，將電池組放電模式關閉，來保護電池防止過放，饋入市電端之電能減少。

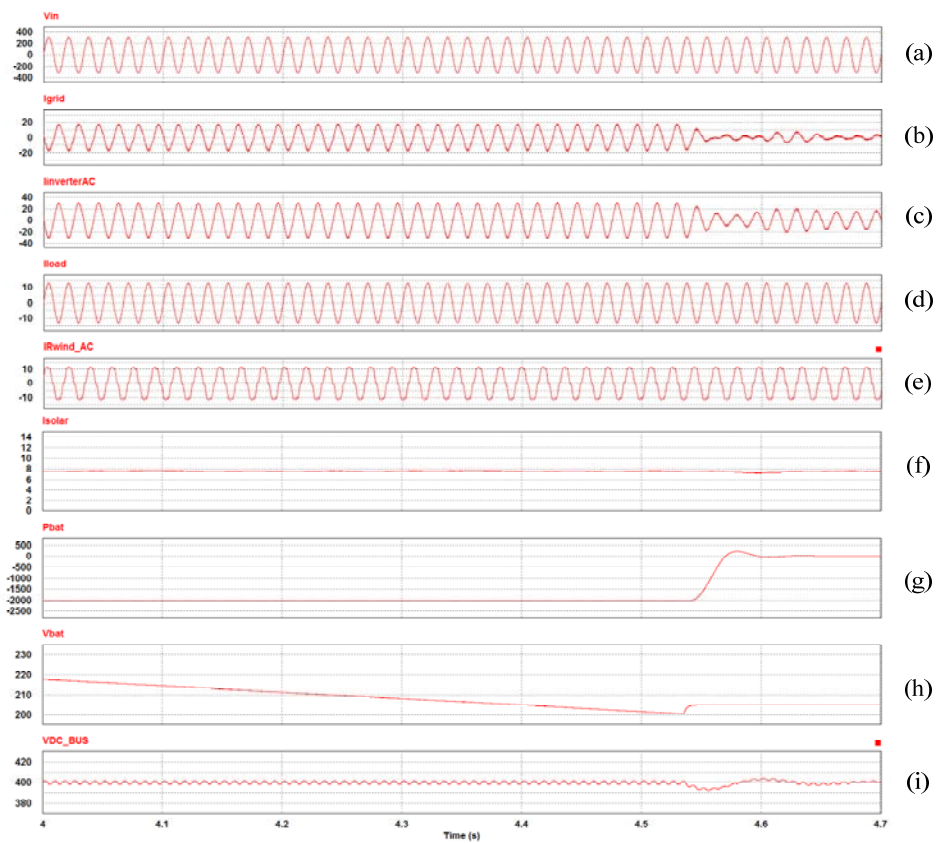


圖 77 模式五下整合風光電發電系統之併網型直流耦合式電能轉換介面之模擬結果，(a) $V_{in}$ ，(b) $i_{grid}$ ，(c) $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{Rwind\_AC}$ ，(f) $i_{solar}$ ，(g) $P_{bat}$ ，(h) $V_{bat}$ ，(i) $V_{dc\_bus}$ 。

6、模式一： $P_{wind} + P_{solar} < P_{bat}$ (充電) → 模式五： $P_{load} < P_{wind} + P_{solar} + P_{bat}$ (放電)

圖 78 為模式一轉成模式五下整合風光電發電系統之併網型直流耦合式電能轉換介面之暫態模擬結果。圖 78 (a)  $V_{in}$  為市電端電壓、圖 78(b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 78 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 78 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 78 (e)  $i_{Rwind\_AC}$  為風力端 R 相電流、圖 78(f)  $i_{solar}$  為太陽能輸出電流、圖 78(g)  $i_{bat}$  為電池端電流、圖 78(h)  $P_{bat}$  為電池端功率、圖 78 (i)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 78(j)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出在 2.6 秒前功率潮流如模式一，風力發電 1KW 與太陽能發電 1.5KW 與市電共同提供電池 15A 之定電流充電，在 2.6 秒時發生需要電池放電，電池以 2KW 之定功率放電，且因負載設定為 2KW，多餘的功率饋入市電端；此時電池組由充電轉換成放電，而市電由提供電能轉為接受電能，功率潮流由模式一轉變成模式五。

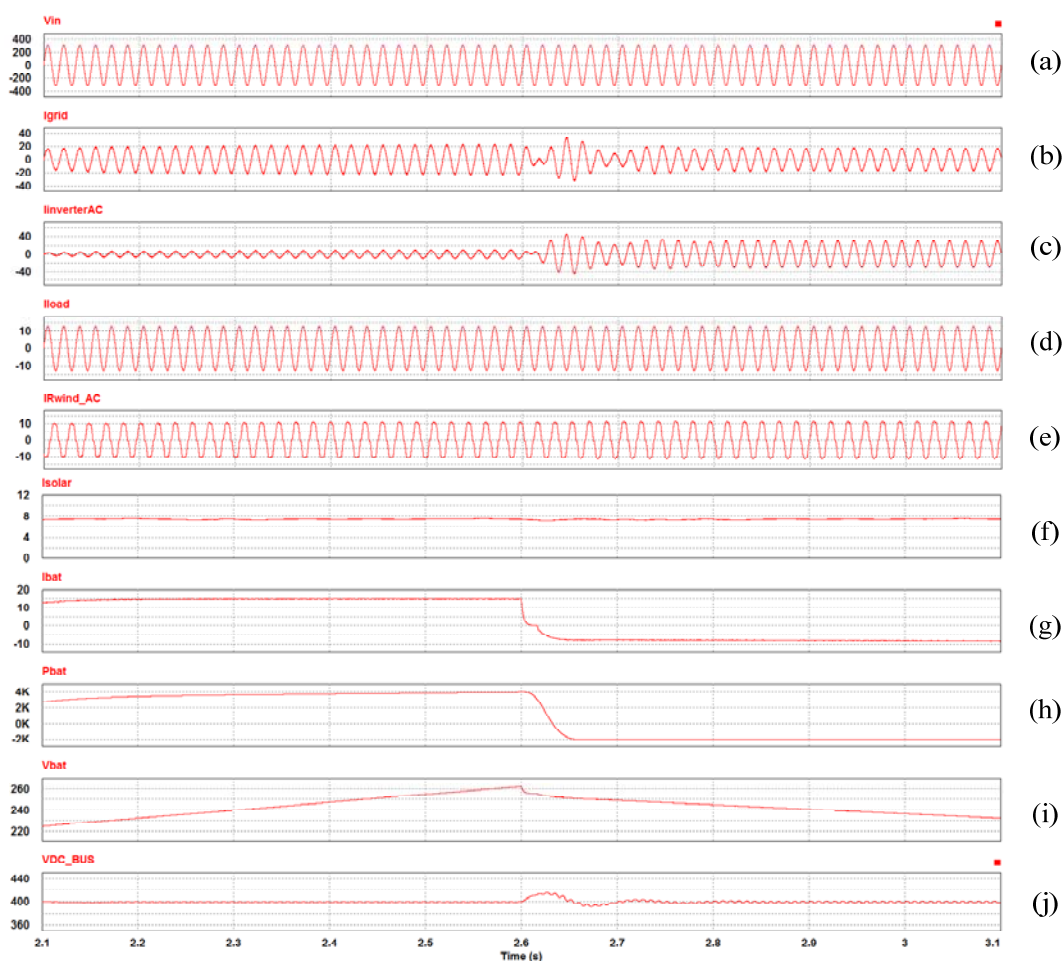


圖 78 為模式一轉成模式五下整合風光電發電系統之併網型直流耦合式併網型電能轉換介面之暫態模擬結果，(a) $V_{in}$ ，(b) $i_{grid}$ ，(c) $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{Rwind\_AC}$ ，(f) $i_{solar}$ ，(g) $i_{bat}$ ，(h) $P_{bat}$ ，(i) $V_{bat}$ ，(j) $V_{dc\_bus}$ 。

7、模式五： $P_{load} < P_{wind} + P_{solar} + P_{bat}$  (放電)  $\rightarrow$  模式一： $P_{wind} + P_{solar} < P_{bat}$  (充電)

圖 79 為模式五轉成模式一下整合風光電發電系統之併網型直流耦合式電能轉換介面之暫態模擬結果。圖 79 (a)  $V_{in}$  為市電端電



壓、圖 79(b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 79 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 79 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 79 (e)  $i_{Rwind\_AC}$  為風力端 R 相電流、圖 79(f)  $i_{solar}$  為太陽能輸出電流、圖 79(g)  $i_{bat}$  為電池端電流、圖 79(h)  $P_{bat}$  為電池端功率、圖 79 (i)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 79(j)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出在 3.97 秒前功率潮流如模式五，電池以 2KW 之定功率與風力發電 1KW 與太陽能發電 1.5KW 共同供給交流負載，因負載設定為 2KW，多餘的功率饋入市電，當 3.97 秒後電池放電至保護電壓 200V，關閉電池放電模式並開啟電池充電模式，電池以 15A 之定電流充電，由於風力發電與太陽能發電之電能小於 15A，不足部分由市電提供；此時電池組由放電轉換成充電，而市電由接受電能轉為提供電能，此時功率潮流由模式五轉變成模式一。

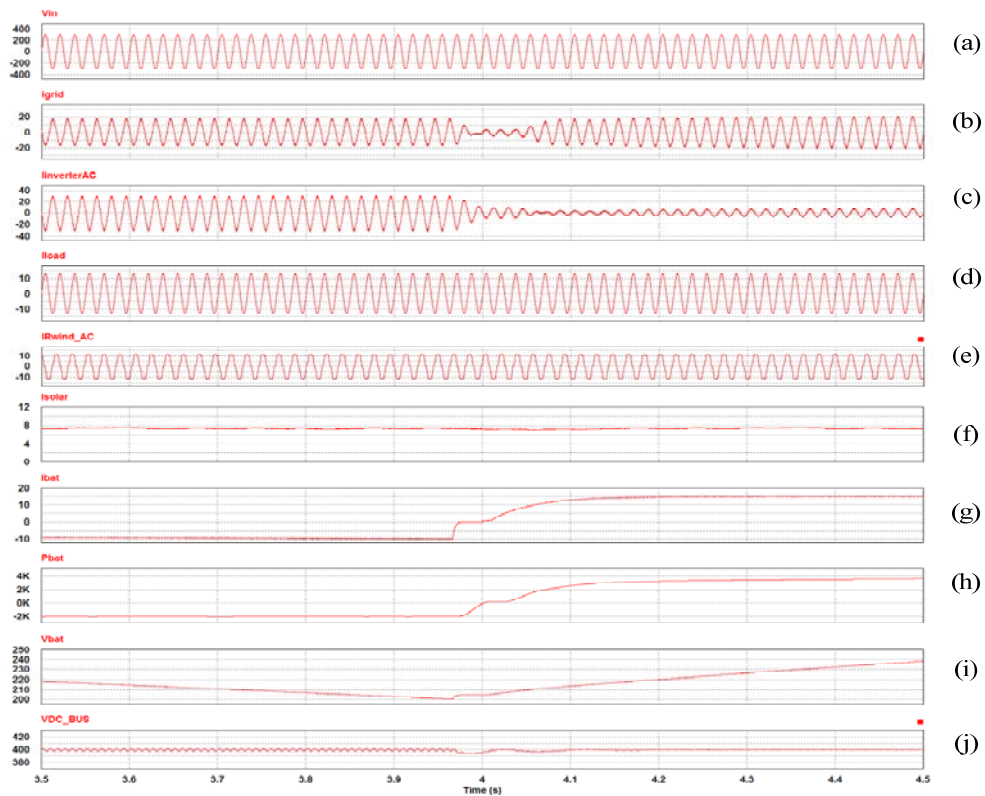


圖 79 為模式五轉成模式一下整合風光電發電系統之併網型直流耦合式電能轉換介面波形之模擬結果，(a) $V_{in}$ ，(b) $i_{grid}$ ，(c) $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{Rwind\_AC}$ ，(f) $i_{solar}$ ，(g) $i_{bat}$ ，(h) $P_{bat}$ ，(i) $V_{bat}$ ，(j) $V_{dc\_bus}$ 。

### (七)、整合風光電發電系統之獨立型直流耦合式電能轉換介面

當市電斷電時，整合風光電之發電系統之直流耦合式電能轉換介面經由線路之開關打開使系統切離市電。獨立運轉時依據交流端負載大小及電池的蓄電量決定電池充放電與風力及太陽能是否放棄 MPPT；如電池進行充電，電池之充電電能為風力發電與太陽能提供給負載消耗後之剩餘電能，在此情況下，電能轉換介面具有備用電源供應器之功能。獨立運轉可區分為六種工作模式，如圖 80

至圖 85，電池組充電時有三種工作模式分別為模式六、模式七及模式八，在電池組充飽電及交流負載為零時電能轉換器介面操作在模式九之熱機狀態，在電池組放電時有兩種工作模式分別為模式十及模式十一。獨立運轉下之工作模式轉換可依據直流匯流排之電壓大小進行判斷；表 1 為獨立運轉下不同工作模式所對應之直流匯流排電壓。

表 1 獨立運轉下不同工作模式所對應之直流匯流排之電壓

模式	直流匯流排電壓(V)	電池組 充電／放電	直流匯流排穩壓轉換器
六	403	電池組 充電	電池組之雙向直流-直流電能轉換器
七	406	電池組 充電	太陽能之直流-直流電能轉換器 限功率模式
八	413	電池組 充電	太陽能之直流-直流電能轉換器 停止運作 風力之直流-直流電能轉換器限 功率模式
九	417	無	電能轉換器熱機

十	400	電池組 放電	電池組之雙向直流-直流電能轉 換器
十一	395	電池組放電	電池組之雙向直流-直流電能轉 換器

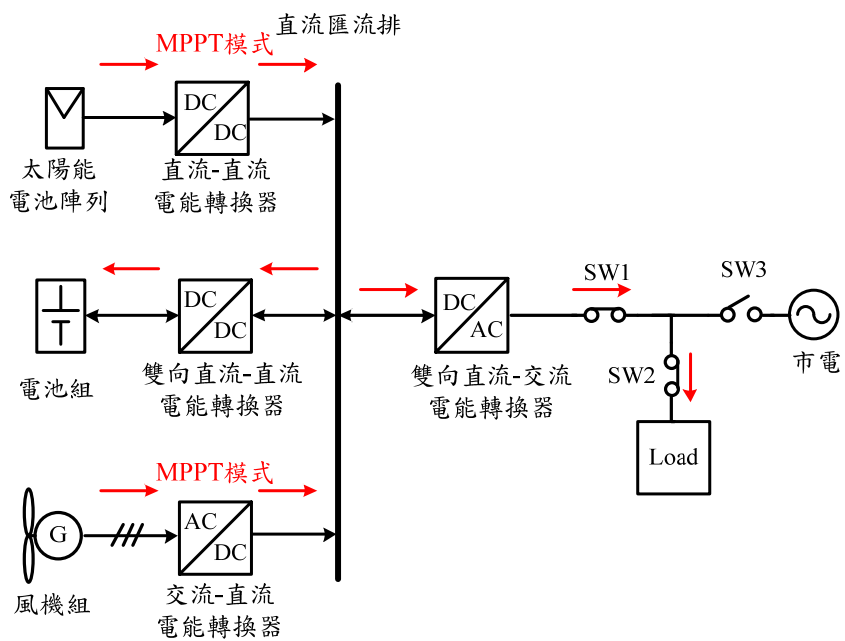


圖 80 整合風光電之發電系統之獨立型直流耦合式電能轉換介面模式

六之功率潮流。

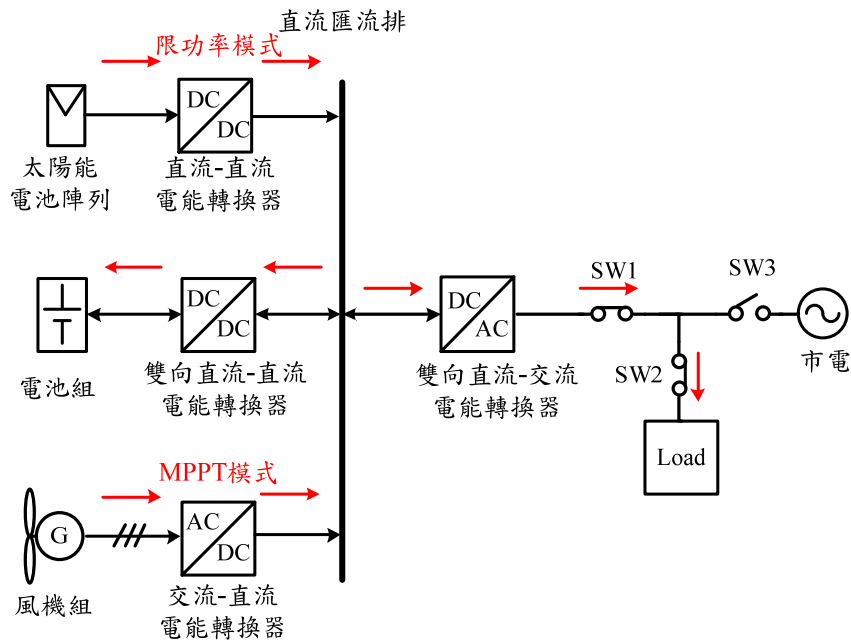


圖 81 整合風光電之發電系統之獨立型直流耦合式電能轉換介面模式

七之功率潮流

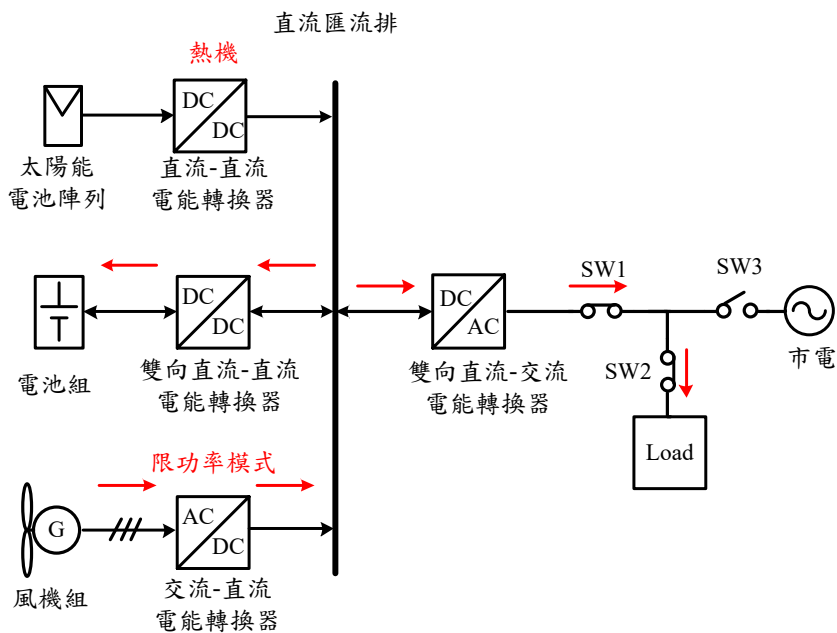


圖 82 整合風光電之發電系統之獨立型直流耦合式電能轉換介面模

式八之功率潮流。

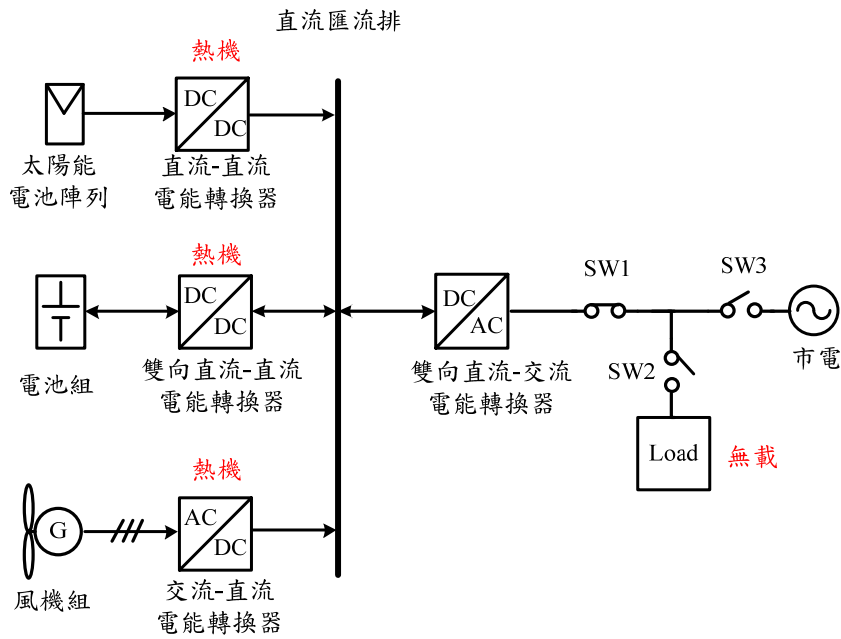


圖 83 整合風光電之發電系統之獨立型直流耦合式電能轉換介面之  
模式九之功率潮流。

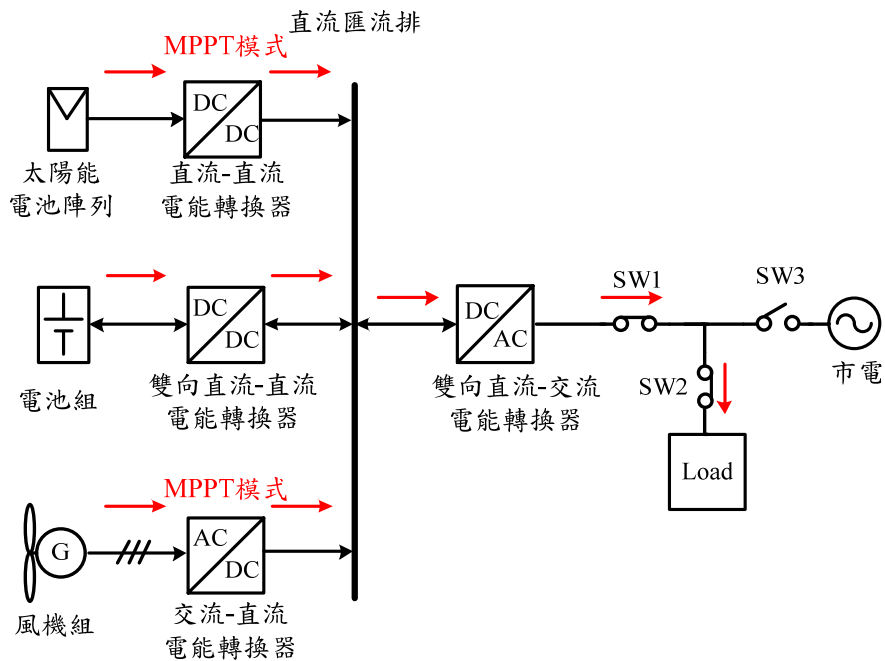


圖 84 整合風光電之發電系統之獨立型直流耦合式電能轉換介面模式  
十之功率潮流。

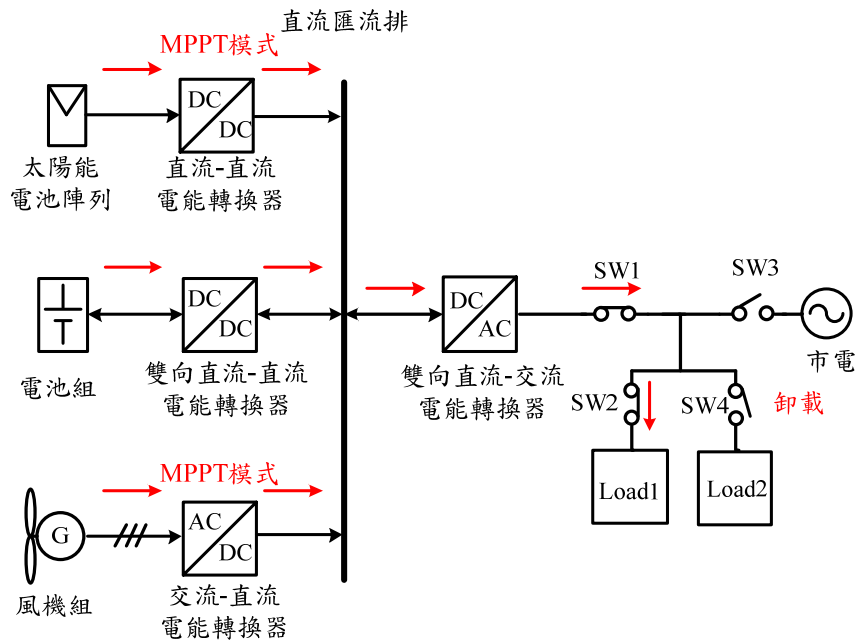


圖 85 整合風光電之發電系統之獨立型直流獨立型電能轉換介面模式

### 十一之功率潮流

1、模式六： $P_{load} + P_{bat} > P_{wind} + P_{solar} > P_{load}$   $V_{dc\_bus} >$  電池充電模式之電壓

設定值 403V

當風力及太陽能發電產生之功率  $P_{wind} + P_{solar}$  大於負載消耗之功率  $P_{load}$  時，且此時電池組尚未充飽，風力及太陽能之發電提供負載後之多餘功率將對電池充電，整合整合風光電之發電系統之直流耦合式電能轉換介面之功率潮流如圖 80 所示。假設交流負載為 2kW，風力發電機之最大輸出功率為 1kW，太陽能發電之最大輸出功率為 1.5kW。

圖 86 為模式六下整合風光電之發電系統之獨立型直流耦合式

電能轉換介面之模擬結果。圖 86 (a)  $V_{load}$  為負載端電壓、圖 86(b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 86 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 86 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 86 (e)  $i_{Rwind\_AC}$  為風力發電機端 R 相電流、圖 86(f)  $i_{solar}$  為太陽能輸出電流、圖 86(g)  $i_{bat}$  為電池端電流、圖 86(h)  $P_{bat}$  為電池端功率、圖 86 (i)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 86(j)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出 1.5 秒前風力及太陽能發電進行 MPPT，此時風力及太陽能發電提供之電能不足負載所需，電池組須經由雙向直流-直流電能轉換器進行放電，且雙向直流-直流電能轉換器需對直流匯流排電壓進行穩壓，其穩壓方式為將雙向直流-直流電能轉換器操作為一升壓型電能轉換器穩壓至 400V；在 1.7 秒附近風力及太陽能提供之電能接近負載所需之電能，直流匯流排之電壓開始慢慢上升；在 2.2 秒後風力及太陽能運轉於最大功率點且產生之功率大於負載所需之功率，直流匯流排電壓會上升至 403V，此值為電池充電模式之電壓設定值，此時電池改為充電模式，並由雙向直流-直流電能轉換器穩壓至 403V，其穩壓方式為當直流匯流排電壓達 403V，開始進行電池充電；直流匯流排電壓小於 403V，則關閉電池充電模式，以上動作重複至太陽能輸出功率、風力輸出功率、負載消耗之功率與電池充電之功率



間達到功率平衡。

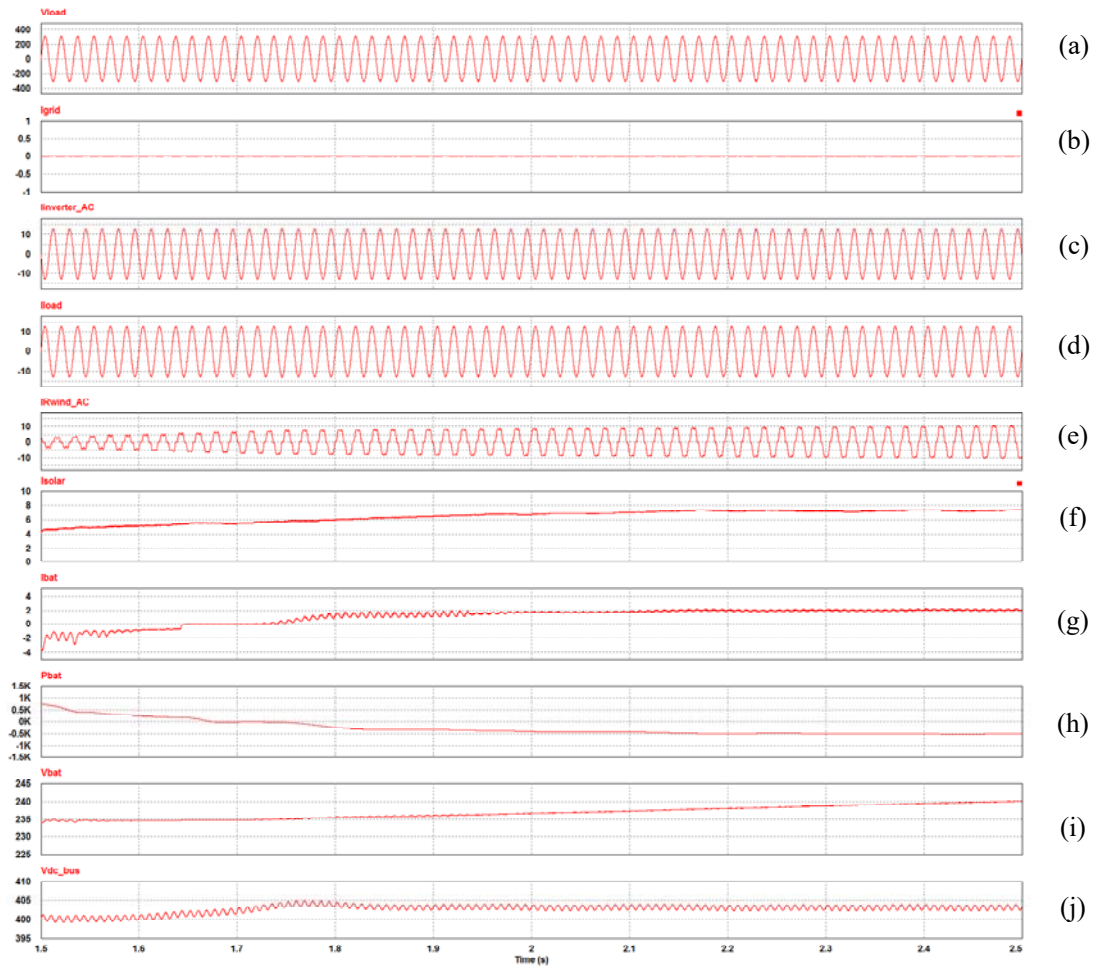


圖 86 模式六下整合風光電之發電系統之獨立型直流耦合式電能轉換

介面之模擬結果，(a) $V_{load}$ ，(b) $i_{grid}$ ，(c) $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{Rwind\_AC}$ ，  
(f) $i_{solar}$ ，(g) $i_{bat}$ ，(h) $P_{bat}$ ，(i) $V_{bat}$ ，(j) $V_{dc\_bus}$ 。

## 2、模式七: $P_{wind} + P_{solar} > P_{load} + P_{bat}$ ( $V_{dc\_bus} >$ 太陽能限功率設定值 406V)

當風力及太陽能發電產生之功率  $P_{wind} + P_{solar}$  大於負載消耗之功率  $P_{load}$  時，此時如電池組接近充飽，多餘的風力及太陽能發電產

生之功率無法完全由電池吸收，太陽能發電將放棄 MPPT 模式，進入限功率模式，整合風光電之發電系統之直流耦合式電能轉換介面之功率潮流如圖 81 所示。假設交流負載為 1.5kW，風力發電機之最大輸出功率為 1kW，太陽能發電之最大輸出功率為 1.5kW。

由於風機限功率發電會使風機轉速提高，當轉速過快時，會啟動洩放電阻之功能；因此，風機轉速增加，會增加噪音，且可能啟動洩放電阻功能會使設備附近溫度升高；而太陽能發電之響應較快，且設備在限功率時不會產生大量之熱能。因此，當風力及太陽能發電其中有一必須執行 MPPT 之功能，而另一必須放棄 MPPT 之功能進入限功率模式時，以風力發電執行 MPPT 之功能而太陽能發電陣列放棄 MPPT 之功能之運轉策略較佳。

圖 87 為模式六轉成模式七下整合風光電之發電系統之獨立型直流耦合式電能轉換介面之模擬結果。圖 87 (a)  $V_{load}$  為負載端電壓、圖 87(b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 87 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 87 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 87 (e)  $i_{Rwind\_AC}$  為風力發電機端 R 相電流、圖 87(f)  $i_{solar}$  為太陽能輸出電流、圖 87(g)  $i_{bat}$  為電池端電流、圖 87(h)  $P_{bat}$  為電池端功率、圖 87 (i)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 87(j)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出 3.47

秒前操作在模式六，直流匯流排電壓穩壓在 403V 並對電池組進行充電，在 3.47 秒後當電池組電壓充電至額定電壓 270V 時，改成電池定電壓充電模式，此時太陽能及風能產生之功率大於負載與電池組所能吸收之功率，直流匯流排電壓會上升至太陽能限功率設定值 406V，將太陽能之直流-直流電能轉換器放棄 MPPT 模式，進入限功率模式，並由太陽能之直流-直流電能轉換器將直流匯流排電壓穩壓至 406V，其穩壓方式為當直流匯流排電壓大於 406V，減少直流-直流電能轉換器之責任週期；當直流匯流排電壓低於 406V，增加直流-直流電能轉換器之責任週期，以上動作重複至太陽能輸出功率、風力輸出功率、負載消耗之功率與電池充電之功率間達到功率平衡。

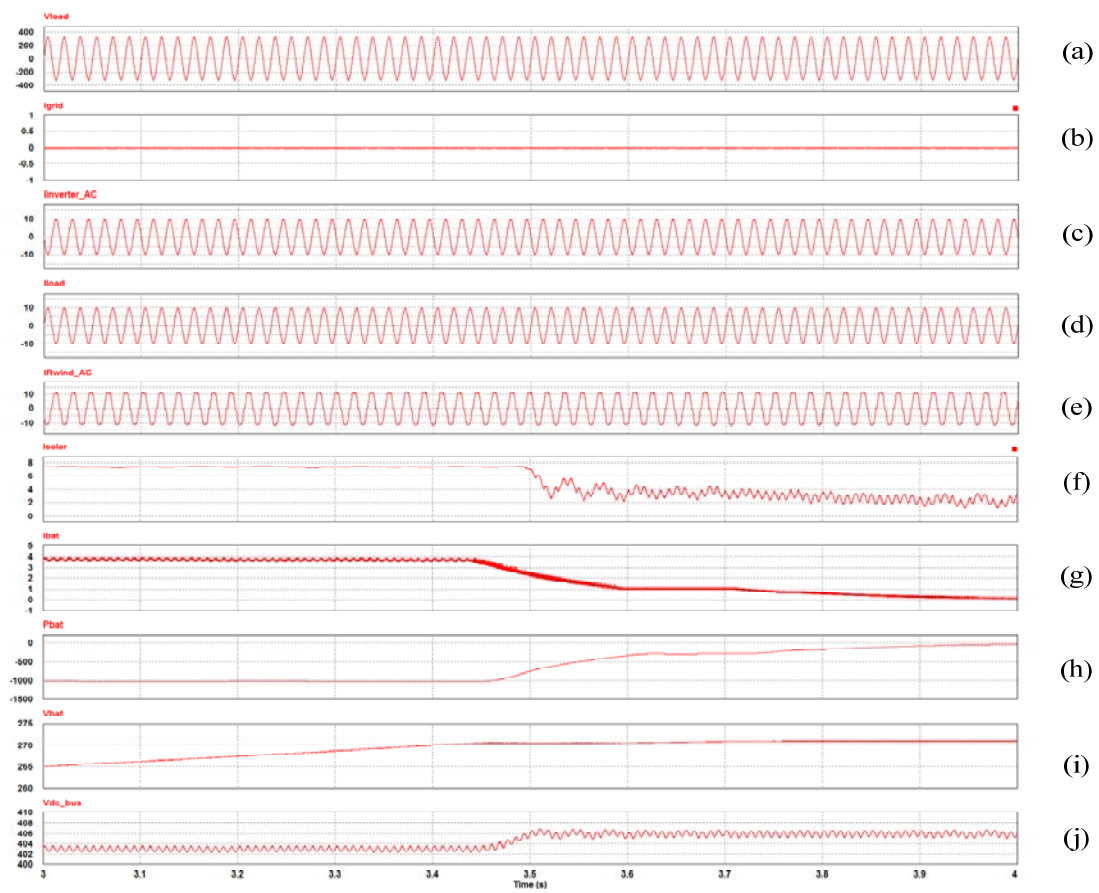


圖 87 模式六轉成模式七下整合風光電之發電系統之獨立型直流耦合式電能轉換介面之模擬結果，(a) $V_{load}$ ，(b) $i_{grid}$ ，(c) $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{Rwind\_AC}$ ，(f) $i_{solar}$ ，(g) $i_{bat}$ ，(h) $P_{bat}$ ，(i) $V_{bat}$ ，(j) $V_{dc\_bus}$ 。

### 3、模式八: $P_{wind} > P_{bat} + P_{load}$ ( $V_{dc\_bus} >$ 風力限功率設定值 413V)

當風力發電產生之功率  $P_{wind}$  大於負載消耗之功率  $P_{load}$  時，此時如電池組接近充飽，多餘的風力發電無法完全由電池吸收，太陽能發電已停止發電，而風力發電放棄 MPPT 模式，進入限功率模式，整合風光電之發電系統之直流耦合式電能轉換介面之功率潮流

如圖 82 所示。假設交流負載為 750W，風力發電機之最大輸出功率為 1kW，太陽能發電之最大輸出功率為 1.5kW。

圖 88 為模式六換成模式七再換成模式八下整合風光電之發電系統之獨立型直流耦合式電能轉換介面之模擬結果。圖 88 (a)  $V_{load}$  為負載端電壓、圖 88(b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 88 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 88 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 88 (e)  $i_{Rwind\_AC}$  為風力發電機端 R 相電流、圖 88(f)  $i_{solar}$  為太陽能輸出電流、圖 88(g)  $i_{bat}$  為電池端電流、圖 88(h)  $P_{bat}$  為電池端功率、圖 88 (i)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 88(j)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出在 2.13 秒前電池組進行定電流充電模式，直流匯流排穩壓在 403V，此時為模式六的工作模式；當電池組在 2.13 秒時電池組充電接近額定電壓 270V，風力及太陽能發電產生之多餘功率無法完全由電池組吸收，太陽能發電先放棄 MPPT 模式，進入限功率模式，電池組進行定電壓充電模式在 2.6 秒前直流匯流排穩壓在 406V，此時為模式七的工作模式；2.6 秒後太陽能發電停止發電，風力發電產生之多餘功率仍使直流匯流排電壓上升，當直流匯流排電壓上升至風力限功率設定值 413V，將風力發電之直流-直流電能轉換器放棄 MPPT 模式，進入風力發電限功率模式，並

由風力發電之直流-直流電能轉換器將直流匯流排電壓穩壓至 413V，其穩壓方式為當直流匯流排電壓大於 413V，減少直流-直流電能轉換器之責任週期;當直流匯流排電壓低於 413V，增加直流-直流電能轉換器之責任週期，以上動作重複至風力輸出功率、負載消耗之功率間達到功率平衡，並維持模式八之工作模式。

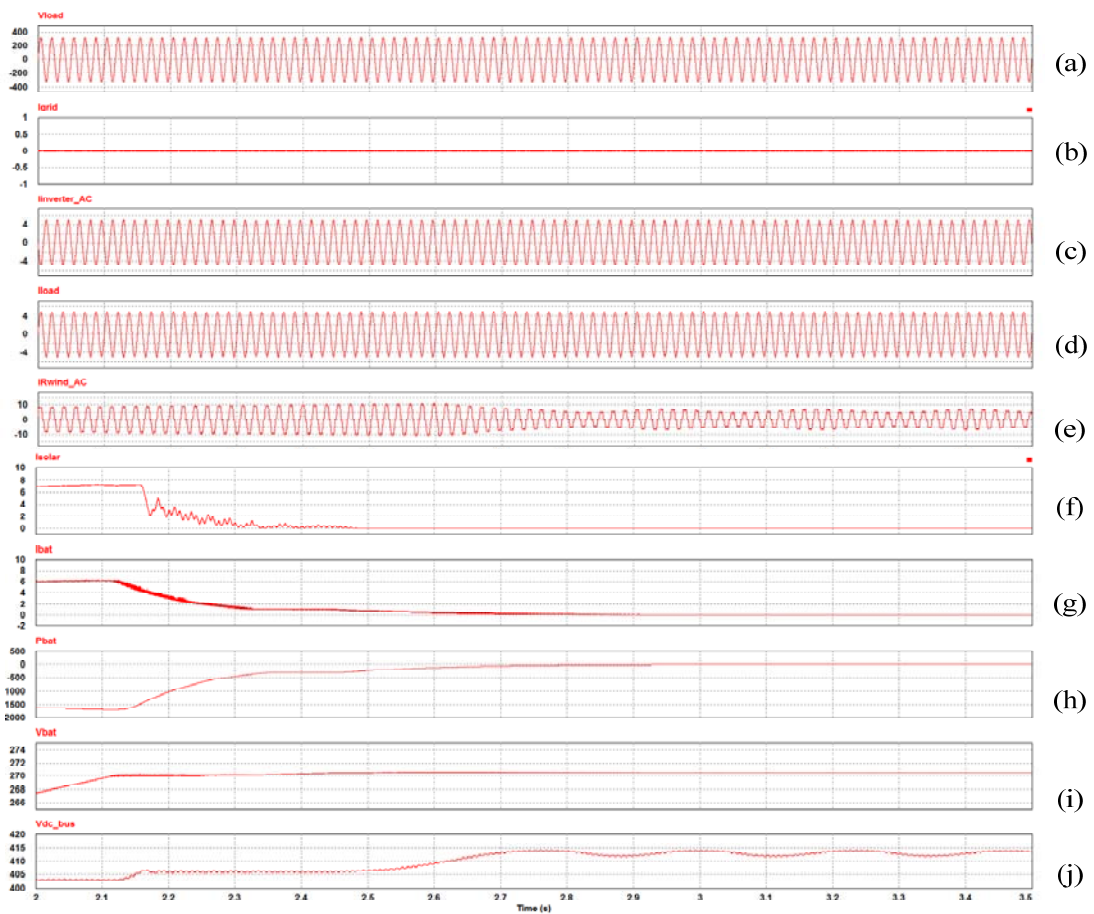


圖 88 模式六換成模式七再換成模式八下整合風光電之發電系統之獨立型直流耦合式電能轉換介面之模擬結果，(a) $V_{load}$ ，(b) $i_{grid}$ ，(c) $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{Rwind\_AC}$ ，(f) $i_{solar}$ ，(g) $i_{bat}$ ，(h) $P_{bat}$ ，(i) $V_{bat}$ ，

(j)  $V_{dc\_bus}$ 。

4、模式九:  $P_{load}=0$ 、 $P_{bat}=0$  ( $V_{dc\_bus}>$ 停機設定值 417)

當  $P_{load}=0$  時，且此時電池組充電至額定電壓 270V，風力發電產生之功率無法由電池吸收，太陽能與風力發電之直流-直流電能轉換器皆為停止發電之熱機狀態，太陽能與風力發電系統之直流耦合式電能轉換介面之功率潮流如圖 83 所示。假設交流負載由 750W 變為空載 0W，風力發電機之最大輸出功率為 1kW，太陽能發電之最大輸出功率為 1.5kW。

圖 89 為整合風光電之發電系統之獨立型直流耦合式電能轉換介面由模式八轉換成模式九之模擬結果。圖 89 (a)  $V_{load}$  為負載端電壓、圖 89(b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 89 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 89 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 89 (e)  $i_{Rwind\_AC}$  為風力發電機端 R 相電流、圖 89(f)  $i_{solar}$  為太陽能輸出電流、圖 89(g)  $i_{bat}$  為電池端電流、圖 89(h)  $P_{bat}$  為電池端功率、圖 89 (i)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 89(j)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出 4 秒時，遇到無載的情況，直流匯流排電壓會由 413V 上升至停止發電熱機之設定值 417V，此時風力及太陽能之直流-直流電能轉換器以及電池組之雙向直流-直流電能轉換器皆為熱機情況，直流匯流

排電壓會因電路損耗緩緩由 417V 下降，並在 4.4 秒時電壓降至 413V，此時風力之直流-直流電能轉換器會啟動，將電壓穩壓至 413V，此時依舊為無載情況。

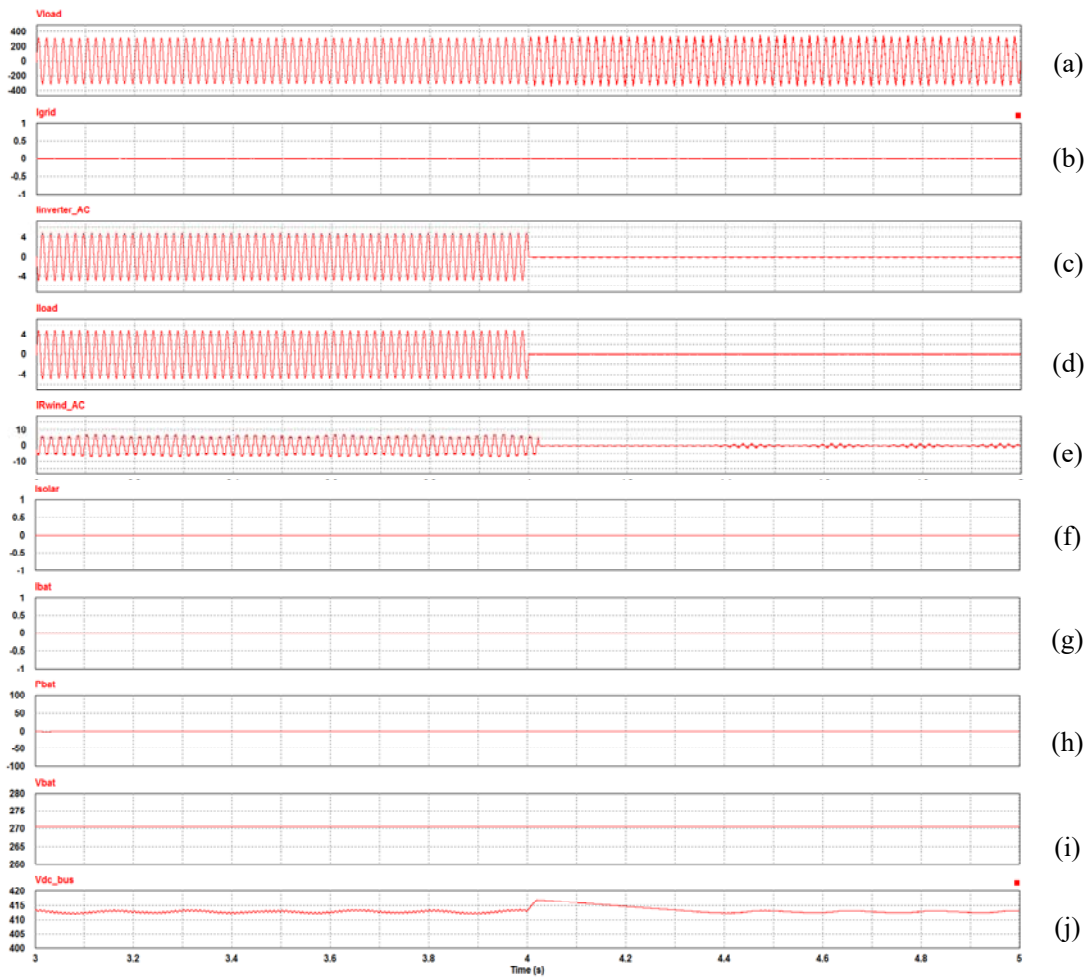


圖 89 為模式八換成模式九下整合風光電之發電系統之獨立型直流耦合式電能轉換介面之模擬結果，(a) $V_{in}$ ，(b) $i_{grid}$ ，(c) $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{Rwind\_AC}$ ，(f) $i_{solar}$ ，(g) $i_{bat}$ ，(h) $P_{bat}$ ，(i) $V_{bat}$ ，(j) $V_{dc\_bus}$ 。



## 5、模式十: $P_{wind}+P_{solar} < P_{load}$ ,

當風力及太陽能發電產生之功率  $P_{wind}+P_{solar}$  小於負載消耗之功率  $P_{load}$  時，此時電池組如尚未放電至保護電壓 200V，則電池組進行放電以提供風力及太陽能發電不足的功率來共同供應負載，整合風光電之發電系統之直流耦合式電能轉換介面之功率潮流如圖 84 所示。假設交流負載為 3.5kW，風力發電機之最大輸出功率為 1kW，太陽能發電之最大輸出功率為 1.5kW。

圖 90 為模式十下整合風光電之發電系統之獨立型直流耦合式電能轉換介面之模擬結果。圖 90 (a)  $V_{load}$  為負載端電壓、圖 90(b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 90 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 90 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 90 (e)  $i_{Rwind\_AC}$  為風力發電機端 R 相電流、圖 90(f)  $i_{solar}$  為太陽能輸出電流、圖 90(g)  $i_{bat}$  為電池端電流、圖 90(h)  $P_{bat}$  為電池端功率、圖 90 (i)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 90(j)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出 1.6 秒至 2.1 秒期間由於直流匯流排電壓未高於電池充電之電壓設定值 403V，表示直流匯流排須由電池組之雙向直流-直流電能轉換器來進行穩壓至 400V，最後負載消耗功率與風力、太陽能及電池組提供功率間達到功率平衡。

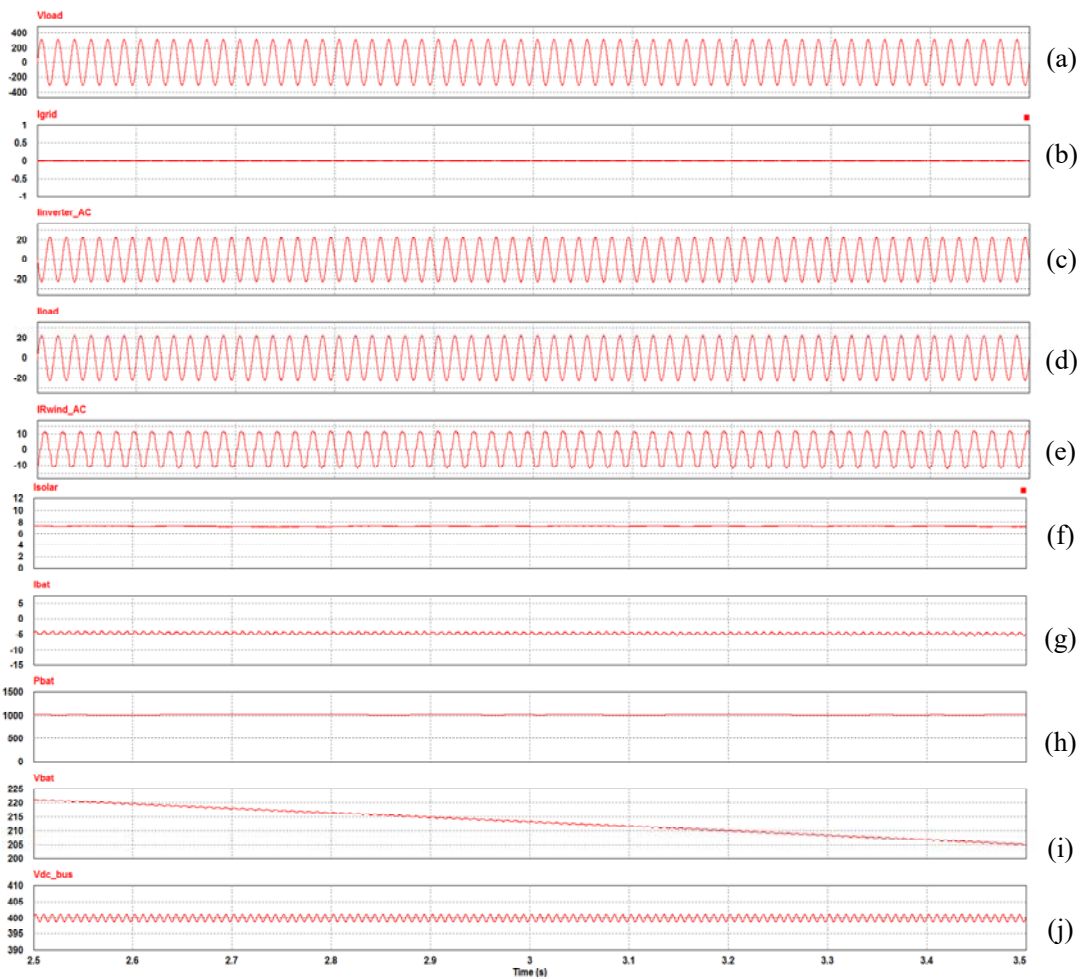


圖 90 為模式十下整合風光電之發電系統之獨立型直流耦合式電能轉換介面之模擬結果，(a) $V_{load}$ ，(b) $i_{grid}$ ，(c) $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{Rwind\_AC}$ ，(f) $i_{solar}$ ，(g) $i_{bat}$ ，(h) $P_{bat}$ ，(i) $V_{bat}$ ，(j) $V_{dc\_bus}$ 。

6、模式十一： $P_{wind}+P_{solar} < P_{load}$ ； $V_{bat}$  = 保護電壓 200V ( $V_{dc\_bus}$ =卸載設定值 395V)

當風力及太陽能發電產生之功率  $P_{wind}+P_{solar}$  小於負載消耗之功率  $P_{load}$  時，此時當電池組放電至保護電壓 200V，則直流匯流排電

壓會下降至卸載設定值 395V，則進行負載卸載，整合風光電之發電系統之直流耦合式電能轉換介面之功率潮流如圖 85 所示。假設交流負載為 3.5kW;卸載後交流負載為 1.75kW，風力發電機之最大輸出功率為 1kW，太陽能發電之最大輸出功率為 1.5kW。

圖 91 為模式十轉換成模式十一再轉換成模式六下整合風光電之發電系統之獨立型直流耦合式電能轉換介面之模擬結果。圖 91 (a)  $V_{load}$  為負載端電壓、圖 91(b)  $i_{grid}$  為市電端電流、圖 91 (c)  $i_{inverter\_AC}$  為雙向直流-交流電能轉換器交流電流、圖 91 (d)  $i_{load}$  為負載端電流、圖 91 (e)  $i_{Rwind\_AC}$  為風力發電機端 R 相電流、圖 91(f)  $i_{solar}$  為太陽能輸出電流、圖 91(g)  $i_{bat}$  為電池端電流、圖 91(h)  $P_{bat}$  為電池端功率、圖 91 (i)  $V_{bat}$  為電池端電壓、圖 91(j)  $V_{dc\_bus}$  為直流匯流排電壓。由模擬結果可看出 3.79 秒前為模式十工作模式，由風力及太陽能及電池組共同提供負載消耗，當電池組放電至保護電壓 200V 時，關閉電池組之穩壓模式來保護電池避免過放，此時風力及太陽能發電功率不足以提供負載消耗，在 3.81 秒時直流匯流排電壓會下降至卸載設定值 395V，進行卸載工作模式十一，將負載卸除後，風力及太陽能發電產生之多餘功率無法由負載消耗完，使直流匯流排電壓上升至 403V，電池組進行定電流充電模式，將多餘的風力及太

陽能發電功率由電池組吸收且 3.85 秒至 4.15 秒為模式轉換暫態時間，所以充電電流漣波較大，並維持在模式六之工作模式。

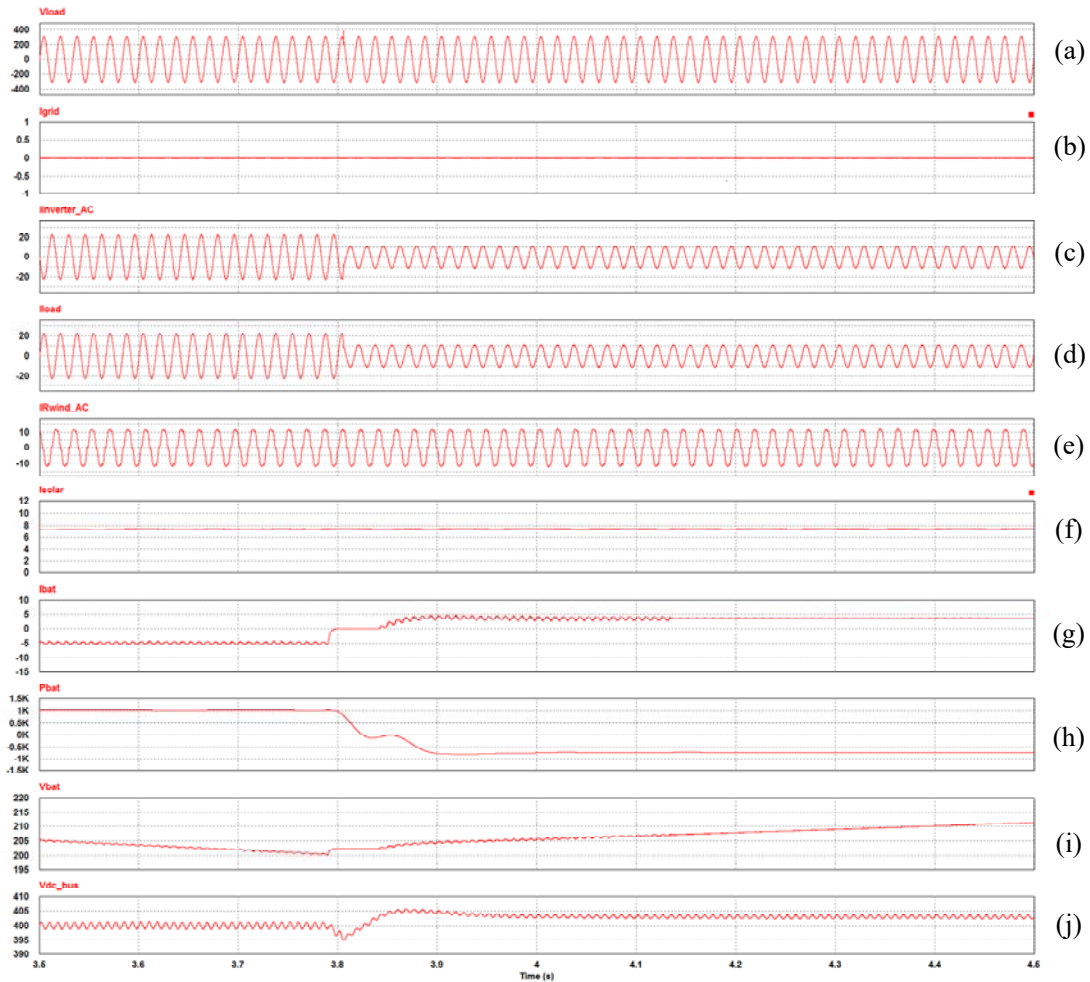


圖 91 為模式十換成模式十一再換成模式六整合風光電之發電系統之獨立型直流耦合式電能轉換介面之模擬結果，(a) $V_{load}$ ，(b) $i_{grid}$ ，(c) $i_{inverter\_AC}$ ，(d)  $i_{load}$ ，(e)  $i_{Rwind\_AC}$ ，(f) $i_{solar}$ ，(g) $i_{bat}$ ，(h) $P_{bat}$ ，(i) $V_{bat}$ ，(j) $V_{dc\_bus}$ 。

#### 肆、主要發現與結論

整合風光電之發電系統之直流耦合電能轉換介面依市電正常與否可分為市電併聯運轉與獨立運轉等兩種工作方式。當市電正常時，連接小型風力與太陽能發電之電能轉換器皆隨時執行 MPPT 功能，電能轉換介面依據電池組之充/放電狀態，可區分為五種工作模式，在電池組充電時有三種工作模式，而在電池組放電時有兩種工作模式。當市電斷電時，電能轉換介面依據交流端負載大小及電池的蓄電量決定電池充放電與風力及太陽能發電是否放棄 MPPT;而電池之充電電能為風力與太陽能發電提供給負載消耗後之剩餘電能。在此情況下，電能轉換介面具備用電源供應器之功能。獨立運轉可區分為六種工作模式，獨立運轉下之工作模式之轉換可依據直流匯流排之電壓大小進行判斷，電池組充電時有三種工作模式，而在電池組充飽電及交流負載趨近於零時有一種工作模式，此模式下電能轉換器處於熱機狀態，在電池組放電時亦有兩種工作模式。為驗證所發展之直流耦合式之電能轉換界面於併網與獨立運轉下之功能，計畫中進行電腦模擬，模擬結果證實其可行性。

## 伍、參考文獻

- [1] D. Pendergast, “Kyoto and Beyond: Development of Sustainable Policy”, IEEE EIC Climate Change Technology, 2006, pp. 1-3.
- [2] J. Arai, K. Iba, T. Funabashi, Y. Nakanishi, K. Koyanagi, and R. Yokoyama, “Power electronics and its applications to renewable energy in Japan”, IEEE Circuits and Systems Magazine, Vol. 8, 2008, pp. 52-66.
- [3] 葉惠青, “我國的永續能源政策”, 綠色關鍵技術與研發環境建構, 2008.
- [4] 黃奕儒, “全國能源會議後我國能源發展之布局及策略”台灣經濟研究月刊, 第 38 卷第 6 期, pp.17-17, 2015.
- [5] [http://www.ndc.gov.tw/Content\\_List.aspx?n=9D024A4424DC36B9&upn=6E972F5C30BF198F](http://www.ndc.gov.tw/Content_List.aspx?n=9D024A4424DC36B9&upn=6E972F5C30BF198F).
- [6] Stefan Gsänger and Jean-Daniel Pitteloud, 2015 Small Wind World Report Summary, World Wind Energy Association, 2015.
- [7] 宋承穎, “全球小型風力機測試認證現況與發展”, IT IS 產業評析, 2015。
- [8] 鄭景木, 林彥廷, 蘇煒年, 黃金城, “小型風力機之國際應用趨勢及其國內研發技術現況”, 臺灣能源期刊, 第三卷, 第一期, 第 117-126 頁。
- [9] C. J. Hanley, G. H. Peek, and J. D. Boyes, 2008, “Solar Energy Grid Integration Systems–Energy Storage (SEGIS-ES)”, SANDIA REPORT, July.
- [10] 蘇偉府, 2001, 電力負載管理與供電品質提升之策略分析, 國立成功大學, 碩士論文。

- [11] 李東璟，黃怡碩，黃永福，2012，“新世代大型儲能系數之探討”，*電工通訊季刊*，頁 64-71，六月。
- [12] P.Manimekalai, R.Harikumar, S.Raghavan“An Overview of Batteries for Photovoltaic (PV) Systems”, *International Journal of Computer Applications*, Vol. 82 , No 12, Nov. , 2013, pp. 28-32.
- [13] Francisco Díaz-González, Andreas Sumper, Oriol Gomis-Bellmunt, Roberto Villafáfila-Robles, “A review of energy storage technologies for wind power applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, pp. 2154-2172.
- [14] Marcelo Godoy Simões, Tiago Davi Curi Busarello, Abdullah Saad Bubshait, Farnaz Harirchi, José Antenor Pomilio, Frede Blaabjerg, “Interactive smart battery storage for a PV and wind hybrid energy management control based on conservative power theory”, *International Journal of Control*, Vol.89, No.4, 2016, pp. 850-870.
- [15] Tarek M. Masaud, Keun Lee, P. K. Sen, “An overview of energy storage technologies in electric power systems: What is the future?”, *North American Power Symposium (NAPS)*, 2010, 26-28 September, pp.1-6.
- [16] S. Kumaravel,S. Ashok, “Optimal Power Management Controller for a Stand-alone Solar PV/Wind/Battery Hybrid Energy System” *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Vol.37,2015,pp.407-415.
- [17] Farzam Nejabatkhah, Yun Wei Li, “Overview of Power Management Strategies of Hybrid AC/DC Microgrid,” *IEEE Power Electronics Society*, Vol.30, No.12, 2014, pp.7072-7089.

- [18] Rashid Al Badwawi<sup>1</sup>, Mohammad Abusara, Tapas Mallick, “A Review of Hybrid Solar PV and Wind Energy System,” Smart Science, Vol.3, 2015, pp.127-138.
- [19] Fengge Zhang, Xuanyi Chen, Xiaoju Yin, Zhaosheng Wang, “An Improved Capacity Ratio Design Method Based on Complementary Characteristics of Wind and Solar”, Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2013, pp.405-408.
- [20] F. Valenciaga and P. F. Puleston, “Supervisor Control for a Stand-Alone Hybrid Generation System Using Wind and Photovoltaic Energy”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, Issue 2, 2005, pp. 398 – 405.
- [21] Ye Zhang, Hong Jie Jia, Li Guo, “Energy management strategy of islanded microgrid based on power flow control”, IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2012, pp.1-8.
- [22] 孫禹華, 2006, “鉛酸電池週期性放電過程分析與殘電估算方法之研究”, 國立高雄應用科技大學, 碩士論文。
- [23] 黃世昌, 1994, 三相蓄電池儲能系統之研製, 國立清華大學, 碩士論文。孫禹華, 2006, “鉛酸電池週期性放電過程分析與殘電估算方法之研究”, 國立高雄應用科技大學, 碩士論文。
- [24] Nasrudin Abdul Rahim, Jeyraj Selvaraj, 2011, “A Novel Multi-String Five-Level PWM Inverter for Photovoltaic Application,” IEEE International Electric Machines & Drives Conference(IEMDC).
- [25] Mohan, Undeland, Robbins, 2008, 電力電子學, 江炫樟譯, 全華圖



書股份有限公司。

- [26] 張益豪，2013，具電池儲能之太陽能發電系統之研製，國立高雄應用科技大學，碩士論文

## Operation strategy for grid-tied DC-coupling power converter interface integrating wind/solar/battery

H L Jou<sup>1,4</sup>, J C Wu<sup>2</sup>, J H Lin<sup>1</sup>, W N Su<sup>3</sup>, T S Wu<sup>3</sup> and Y T Lin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering National Kaohsiung University of Applied Sciences Kaohsiung, Taiwan

<sup>2</sup>Department of Microelectronics Engineering National Kaohsiung Marine University Kaohsiung, Taiwan

<sup>3</sup>Institute of Nuclear Energy Research, AEC, EY, Taiwan

E-mail: hljou5519@gmail.com

**Abstract.** The operation strategy for a small-capacity grid-tied DC-coupling power converter interface (GDPCI) integrating wind energy, solar energy and battery energy storage is proposed. The GDPCI is composed of a wind generator, a solar module set a battery bank, a boost DC-DC power converter (DDPC), a bidirectional DDPC power converter, an AC-DC power converter (ADPC) and a five-level DC-AC inverter (DAI). A solar module set, a wind generator and a battery bank are coupled to the common DC bus through the boost DDPC, the ADPC and the bidirectional DDPC, respectively. For verifying the performance of the GDPCI under different operation modes, computer simulation is carried out by PSM.

### 1. Introduction

The conventional fossil fuels have resulted in the problems of greenhouse emissions and climate change and thus damaged the earth's environment seriously [1,2]. Paris agreement on global reduction of greenhouse emissions to relieve the climate change has promoted to use the renewable energies worldwide [3]. The wind energy and solar energy are the most attractive renewable energy sources now. However, the wind energy and solar energy have the characteristics of instability, intermittence and hard to be predicted. Battery energy storage can be integrated to make the energies of wind generator and solar module set more stable and reliable [4-7].

Power converter interface is one of the key technologies for the applications of the wind energy and solar energy effectively. The power converter interface for integrating wind energy, solar energy and battery energy storage can be divided into the AC-coupling topology [8,9] and DC-coupling topology [8-12]. Figure 1 shows the diagram of AC-coupling topology, and the diagram of DC-coupling topology is shown in figure 2.

As seen in figure 1, it consists of a wind generator, a solar module set, a battery bank, an AC-DC power converter (ADPC), a DC-DC power converter (DDPC), a bidirectional DDPC and three DC-AC inverters (DAIs). The output AC voltage of wind generator is rectified by an ADPC, and a DAI for converting the DC power to AC power injecting into the grid or supplying to the load. The module set is connected to a DDPC and a DAI connecting in cascade for converting the solar power to AC power injecting into the grid or supplying to the load. A combination of a bidirectional DDPC and a DAI is

used for charging or discharging the battery bank. In this circuit, three individual DAIs are needed to couple the energies of wind energy, solar energy and battery energy storage at the AC grid. It is known as AC-coupling topology.

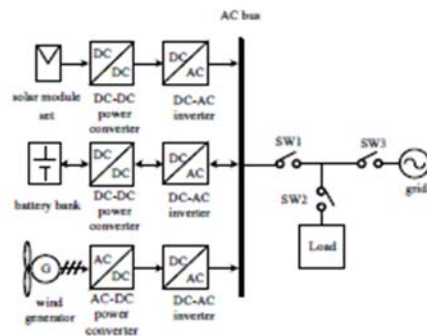


Figure 1. Diagram of AC-coupling topology for integrating the wind/ solar/ battery.

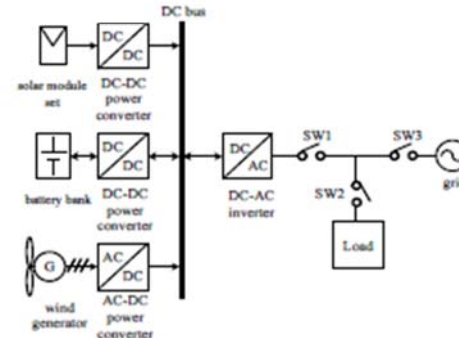


Figure 2. Diagram of DC-coupling topology for integrating the wind/ solar/ battery.

As seen in figure 2, it consists of a wind generator, a solar module set, an ADPC, a DDPC, a bidirectional DDPC and a DAI. The output of wind generator is converting to the DC power by an ADPC. A DDPC has the function of regulating the voltage and the output power of solar module set. The battery bank is connected to a bidirectional DDPC for charging or discharging the battery power. The outputs of ADPC, DDPC and bidirectional DDPC are connected to a common DC bus of DAI which is operated as an interface to the grid or the load. It is known as DC-coupling topology. In this circuit, only a DAI is shared by three energy sources.

As can be seen in figures 1 and 2, it can be found that six power converters are required in AC-coupling topology and only four power converters are used in the DC-coupling topology. Hence, it can save two DAIs in the DC-coupling topology although the capacity of DAI should be enlarged slightly. Moreover, the energy is only processed by two power conversion stages in the DC-coupling topology but is processed by four power conversion stages in the AC-coupling topology when the charging power of battery bank is from the output powers of wind generator and solar module set. Therefore, the DC-coupling topology has the advantages of simplified hardware, lower cost and higher energy efficiency.

In this paper, operation strategy for small-capacity grid-tied DC-coupling power converter interface (GDPCI) integrating the wind energy, solar energy and battery energy storage is presented. The output powers of wind generator, solar module set and battery bank are coupling to the common DC-bus of a simplified five-level inverter through an ADPC, a boost DDPC and a bidirectional DDPC, respectively. The performance of GDPCI under different operation modes is validated by the simulation of PSIM.

## 2. Circuit topology

Figure 3 is the power circuit for the proposed small-capacity GDPCI integrating the solar energy, wind energy and battery energy storage. It is composed of a permanent magnetic synchronous generator (PMSG), a solar module set, battery bank, an ADPC, a boost DDPC, a bidirectional DDPC and a bidirectional five-level DAI. The ADPC is connected to PMSG, and it is comprised of a three-phase rectifier and a boost DDPC due to the consideration of cost in the application of small-capacity wind power generator. The bidirectional DAI is a five-level inverter which can save two power electronic switches as compared with the conventional five-level T-type power converter.

## 3. Operation strategy

The operation of proposed small-capacity GDPCI can be divided into five operation modes based on the charge/discharge of battery bank. Modes 1, 2, 3 are the charging modes, and modes 4 and 5 are the discharging modes. Table 1 shows the conditions of different modes. The power flow diagrams for five operation modes are shown in figures 4-8.

Table 1. Conditions of different operation modes.

mode	conditions	charge/discharge
1	$P_{wind} + P_{solar} < P_{bat}$	charge
2	$P_{bat} + P_{load} > P_{wind} + P_{solar} > P_{bat}$	charge
3	$P_{bat} + P_{load} < P_{wind} + P_{solar}$	charge
4	$P_{load} > P_{wind} + P_{solar} + P_{bat}$	discharge
5	$P_{load} < P_{wind} + P_{solar} + P_{bat}$	discharge

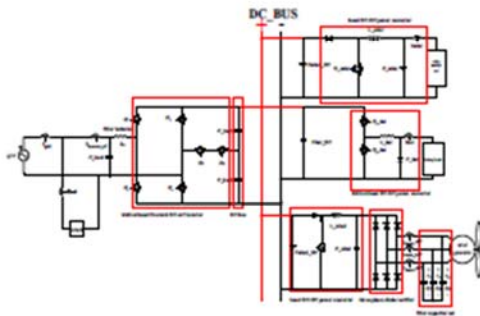


Figure 3. Power circuit for proposed small-capacity GDPCI.

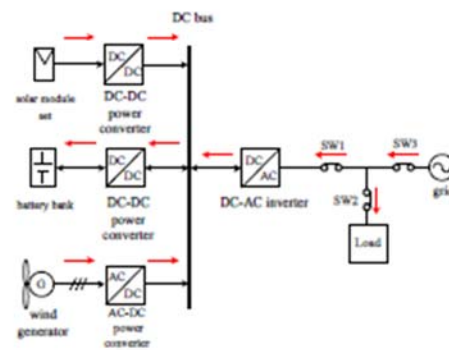


Figure 4. Power flow diagram for mode 1.

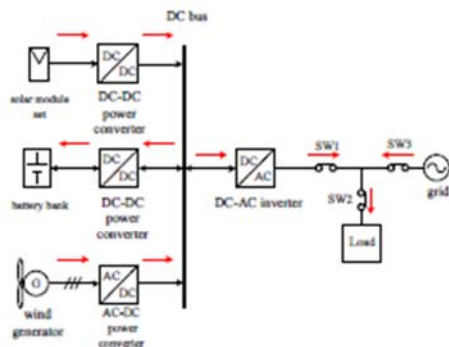


Figure 5. Power flow diagram for mode 2.

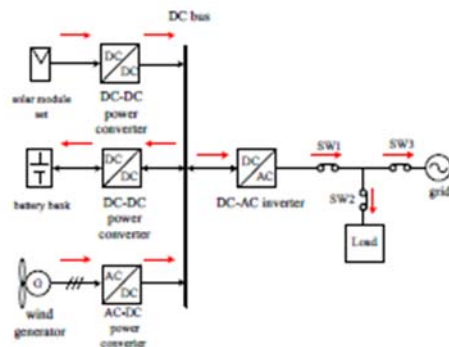


Figure 6. Power flow diagram for mode 3.

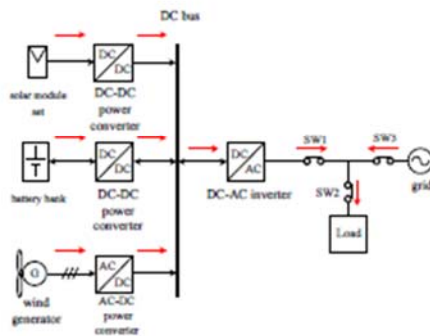


Figure 7. Power flow diagram for mode 4.

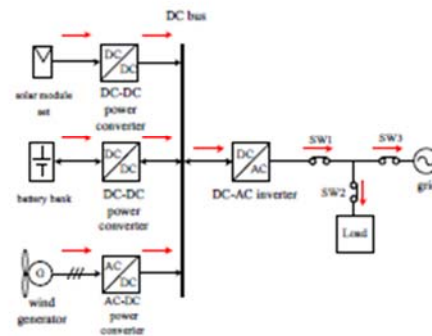


Figure 8. Power flow diagram for mode 5.

### 3.1. Charge

- mode 1:

The generated power of wind solar is smaller than the demanded power of battery bank. In this condition, the insufficient charging power is supplied by the grid. The power flow diagram of the GDPCI is shown in figure 4.

- mode 2:

The generated wind power and solar power is larger than the demanded power of battery bank but smaller than the demanded power of battery bank and the load. In this condition, the generated wind generator and solar module set is charged to the battery bank, and the additional generated power is supplied to the load. The insufficient demanded load power is supplied by the grid. The power flow diagram of the GDPCI is shown in figure 5.

- mode 3:

The generated power of wind and solar is larger than the demanded power of battery bank and the load. In this condition, the generated wind power and solar power is charged to the battery bank and supplied to the load, and the additional power is fed to the grid. The power flow diagram of the GDPCI is shown in figure 6.

### 3.2. Discharge

- mode 4:

The demanded power of load is larger than the generated power of wind and solar power and the output power of the battery bank in this condition. The generated power of wind and solar as well as the output power of the battery bank is supplied to the load, and the grid supplies the insufficient demanded power of load. The power flow diagram of the GDPCI is shown in figure 7.

- mode 5:

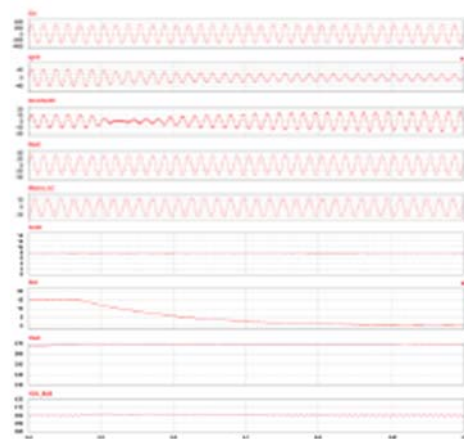
The generated power of wind and solar power and the output power of the battery bank are larger than the demanded power of the load in this condition. The generated wind power, solar power and the output power of the battery bank are supplied to the load, and the additional power is fed to the grid. The power flow diagram of the GDPCI is shown in figure 8.

## 4. Simulation results

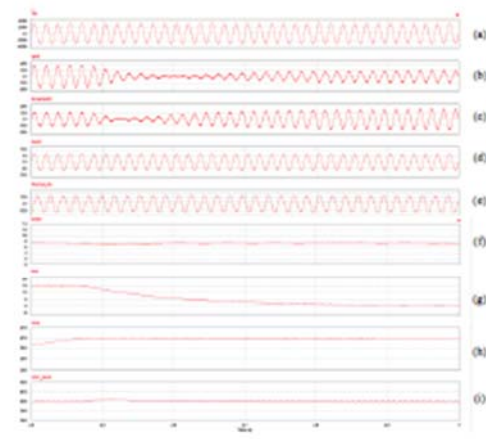
Computer simulation by PSIM is used to validate the function of the GDPCI under different operation modes. The battery bank is charged by the hybrid constant-current (CC)/constant-voltage (CV) strategy. The value of CC is 15 A, and the value of CV is 270 V.

Figure 9 shows the simulation result during the transient from mode 1 to mode 2. The demanded load power is 5 kW, the output power of wind generator is 1 kW and the output power of solar is 1.5 kW. It can be found that the battery bank is charged by 15 A before 3.47 s. The battery voltage reaches

270 V at 3.47 s, and the battery bank is changed from the CC to the CV. The generated power of wind and solar is charged to the battery bank when the generated power is small than the charging power of battery bank. The current charging to the battery bank is decreased gradually when the battery bank is charged by CV. The demanded power of the battery bank is then smaller than the generated power of wind and solar at about 3.52 s. And then, the additional generated power is supplied to the load and the grid supplies the insufficient load power. The operation of GDPCI is changed from mode 1 to mode 2.



**Figure 9.** Simulation result during the transient from mode 1 to mode 2, (a)  $v_{in}$ , (b)  $i_{grid}$ , (c)  $i_{inverter\_AC}$ , (d)  $i_{load}$ , (e)  $i_{Bwind\_AC}$ , (f)  $i_{solar}$ , (g)  $i_{bat}$ , (h)  $v_{bat}$ , (i)  $V_{dc\ bus}$ .

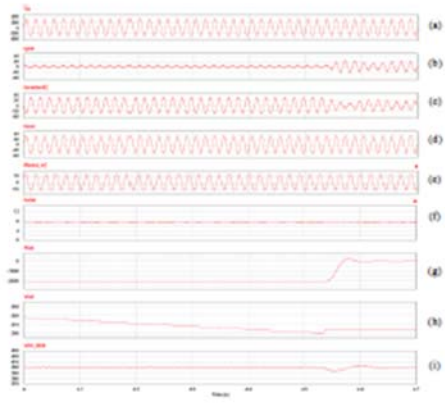


**Figure 10.** Simulation result simulation result during the transient from mode 1 to mode 3, (a)  $v_{in}$ , (b)  $i_{grid}$ , (c)  $i_{inverter\_AC}$ , (d)  $i_{load}$ , (e)  $i_{Bwind\_AC}$ , (f)  $i_{solar}$ , (g)  $i_{bat}$ , (h)  $v_{bat}$ , (i)  $V_{dc\ bus}$ .

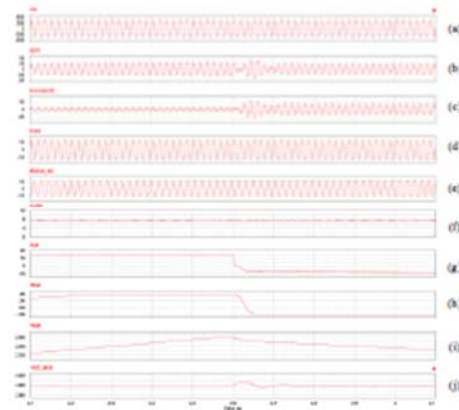
Figure 10 shows the simulation result during the transient from mode 1 to mode 3. The demanded power of load is 1 kW, the output power of wind generator is 1 kW and the generated power of solar is 1.5 kW. It can be found that the battery bank is charged by CC 15 A before 3.47 s. The voltage of battery bank reaches 270 V at 3.47 s, and the battery bank is changed from CC to CV. The battery current is decreased gradually when the battery bank is charged by the CV. The demanded power charged to the battery bank is smaller than the generated power of wind and solar at about 3.52 s. Then, the additional generated power is supplied to the load. The charging power of the battery bank is still decreased gradually, and the additional generated power after absorbing by the load is fed to the grid at about 3.6 s. The operation of GDPCI is changed from mode 1 to mode 3.

Figure 11 shows the simulation result for mode 4. The demanded load power is 5 kW. The output power of wind generator and solar module set are respectively 1 kW and 1.5 kW and the power discharging by the battery bank is 2 kW. The generated wind power, and solar power as well as the discharging power of battery bank are supplied to the load, and the grid supplies the insufficient load power. The power of battery bank is turned off while the voltage of battery bank reached 200 V for protecting over-discharging of battery bank.

Figure 12 shows the simulation result during the transient form mode 1 to mode 5. The demanded load in this condition is 2 kW. The output power of wind generator is 1 kW, and the output power of solar module set is 1.5 kW. The battery bank is charged by a constant current of 15 A before 2.6 s, and the GDPCI is thus operated in mode 1. The battery bank is changed from CC charging of 15 A to constant power (CP) discharging of 2 KW at 2.6 s. The operation of GDPCI is changed from mode 1 to mode 5.



**Figure 11.** Simulation result for mode 4, (a)  $v_{in}$ , (b)  $i_{grid}$ , (c)  $i_{inverter AC}$ , (d)  $i_{load}$ , (e)  $i_{wind AC}$ , (f)  $i_{solar}$ , (g)  $i_{bat}$ , (h)  $v_{bat}$ , (i)  $V_{dc\_bus}$ .



**Figure 12.** Simulation result during the transient from mode 1 to mode 5, (a)  $v_{in}$ , (b)  $i_{grid}$ , (c)  $i_{inverter AC}$ , (d)  $i_{load}$ , (e)  $i_{wind AC}$ , (f)  $i_{solar}$ , (g)  $i_{bat}$ , (h)  $v_{bat}$ , (i)  $V_{dc\_bus}$ .

## 5. Conclusions

The number of power converters using in the grid-tied AC-coupling GDPCI for integrating wind energy, solar energy and battery energy storage is six, and that using in the GDPCI is only four. Besides, the number of power conversion stages for charging the battery bank by the wind energy or solar energy is four in the AC-coupling topology, and that is only two in the DC-coupling topology. Therefore, the DC coupling topology is superior to the AC-coupling topology due to the advantages of simplified hardware, lower cost and higher energy efficiency.

The operation of GDPCI integrating small-capacity wind energy, solar energy and battery energy storage are divided into five operation modes based on the charge/discharge of battery bank. Three modes are for charging battery bank, and two modes are for discharging battery bank. Computer simulation verifies the operation strategy of the GDPCI under different operation modes.

## Acknowledgments

The authors would like to express their acknowledgments for the financial support of Institute of Nuclear Energy Research Atomic Energy Council under the contract NL1060284. This paper is commissioned to study, but the paper does not represent the opinions of the commission unit.

## References

- [1] Pendergast D 2006 Kyoto and beyond: Development of sustainable policy *IEEE EIC Climate Change Technol* 1-3
- [2] Arai J, Iba K, Funabashi T, Nakanishi Y, Koyanagi K and Yokoyama R 2008 Power electronics and its applications to renewable energy in Japan *IEEE Circuits and Syst Mag* 8 52-66
- [3] Dimitrow R S 2016 The Paris agreement on climate change: Behind closed doors *Global Environ Politics* 16 1-11
- [4] Manimekalai P, Harikumar R and Raghavan S 2013 An overview of batteries for photovoltaic (PV) systems *Int J of Computer Appl* 82 28-32
- [5] Diaz-González F, Sumper A, Gomis-Bellmunt O and Villafafila-Robles R 2012 A review of energy storage technologies for wind power applications *Renew and Sust Energy Reviews* 2154-72
- [6] Simões M G, Busarello D T C, Bubshait A S, Harirchi F, Pomilio J A and Blaabjerg F 2016

- Interactive smart battery storage for a PV and wind hybrid energy management control based on conservative power theory *Int J of Control* 89 850-70
- [7] Masaud T M, Lee K and Sen P K 2010 An overview of energy storage technologies in electric power systems: What is the future? *North American Power Symposium (NAPS)* pp 1-6
  - [8] Nejabatkhah F and Li Y W 2014 Overview of power management strategies of hybrid AC/DC microgrid *IEEE Power Electron Society* 30 7072-89
  - [9] Badwawi R A, Abusara M and Mallick T 2015 A review of hybrid solar PV and wind energy system *Smart Sci* 3 127-38
  - [10] Zhang F G, Chen X Y, Yin X J and Wang Z S 2013 An improved capacity ratio design method based on complementary characteristics of wind and solar *Electr Mach and Syst (ICEMS)* 405-408
  - [11] Valenciaga F and Puleston P F 2005 Supervisor control for a stand-alone hybrid generation system using wind and photovoltaic energy *IEEE Trans on Energy Conver* 20 398-405
  - [12] Zhang Y, Jia H J and Guo L 2012 Energy management strategy of islanded microgrid based on power flow control *IEEE PES Innovative Smart Grid Technol (ISGT)* 1-8



## (二)國內研討會論文:論文編號 485

中華民國第三十八屆電力工程研討會  
台灣 嘉義縣 2017 年 12 月 1-2 日

### 整合風光電發電系統之直流耦合式獨立型電能轉換介面

周宏亮<sup>1</sup> 吳晉昌<sup>2</sup> 蘇煒年<sup>3</sup> 吳東昇<sup>3</sup> 林彥廷<sup>3</sup> 林建豪<sup>1</sup> 張庭源<sup>1</sup>

Hung-Liang Jou Jun-Chang Wu Wei-Nian Su Tung-Sheng Wu Yan-Ting Lin Jian-Hao Lin Ting-Yuan Zhang

國立高雄應用科技大學電機工程系<sup>1</sup>

Department of Electrical Engineering National Kaohsiung University of Applied Sciences Kaohsiung, Taiwan, R.O.C.

國立高雄海洋科技大學微電子工程系<sup>2</sup>

Department of Microelectronics Engineering National Kaohsiung Marine University Kaohsiung, Taiwan, R.O.C.

行政院原子能委員會核能研究所<sup>3</sup>

The Institute of Nuclear Energy Research Atomic Energy Council, Taiwan, R.O.C.

#### 摘要

本論文之目的在發展一整合風光電發電系統之直流耦合式獨立型電能轉換介面。該直流耦合式電能轉換介面係由一小型風力發電機、一太陽能電池陣列、一儲能電池組、一升壓直流-直流電能轉換器、一雙向直流-直流電能轉換器、一交流-直流電能轉換器及一直流-交流電能轉換器所組成。小型風力發電機、太陽能電池陣列與儲能電池組分別經交流-直流電能轉換器、升壓直流-直流電能轉換器與雙向直流-直流電能轉換器耦合到共用直流匯流排，共用直流匯流排則連接至一共用之直流-交流電能轉換器，而此直流-交流電能轉換器之交流側連接至負載。本論文中將探討直流耦合式獨立型電能轉換介面之運轉策略。為驗證其功能，將利用 PSIM 進行電腦模擬以驗證其可行性。

關鍵字：風力，太陽能，電池儲能，直流耦合式

#### Abstract

A DC coupling power converter interface for wind power/solar power/battery energy storage is developed for the standalone application. The DC coupling power converter interface is composed of a small wind generator, a solar cell array, a battery set, a boost DC-DC power converter, a bidirectional DC-DC power converter, an AC-DC power converter and a DC-AC inverter. The solar cell array, small wind generator and battery set are coupled to the common DC bus through the DC-DC boost power converter, AC-DC power converter and bidirectional DC-DC power converter, respectively. The DC-AC inverter converts the integrated DC power of the common DC bus to AC power and then supply to the loads. In this paper, the operation strategies of DC-coupling power converter interface for the application of wind and solar energies under the standalone mode are studied. To validate the performance of this DC coupling power converter interface under the stand-alone mode, computer simulation by PSIM is carried out.

Keywords: wind power, solar power, battery energy storage, DC coupling

#### 1. 前言

臺灣由於自產能源相當匱乏，所需之能源幾乎依賴進口，且對化石能源之依存度甚高，近年能源價格波動劇烈，且因化石能源之過度使用造成環境污染、全球暖化與全球氣候變遷，形成地球生態浩劫[1-3]。為改善全

球氣候變遷問題，全球溫室氣體減量之壓力日增，而國內之能源需求仍持續成長，臺灣之能源發展所面臨之挑戰甚為嚴峻。為減輕石化能源對環境之嚴重衝擊，因此有京都議定書、哥本哈根協議與巴黎協定達成全球氣候變遷協定，以期減少溫室氣體排放量，強化國際抗暖化。如何減少對傳統石化能源之依賴及節能減碳抗暖化目前已成為普世價值，因此積極發展再生能源已成為不可避免之趨勢。政府為凝聚各界之共識以達到確保國內能源安全、兼顧經濟發展、民生負擔及環境保護，並能因應未來國際政經、能源情勢變動及核四封存後之電力供需不確定性與非核家園等挑戰於民國 104 年 1 月召開全國能源會議；為達成上述目的，必需努力做到需求有效節流、供給穩定開源與環境低碳永續 [4]。為減少對進口能源之依賴與減少碳排放，政府積極推動再生能源，並已將綠能科技列為政府擇定之五大創新產業之一 [5]，而太陽能與風能為最重要之發展重點。

風能與太陽能為目前最具經濟效益之再生能源，如果能夠有效與廣泛的利用風能與太陽能，不但可以減少對石化能源的依賴，更可以減少石化能源造成之環境汙染、降低全球之溫室效應與改善全球氣候變遷，因此世界各主要國家皆積極發展風能與太陽能於發電之應用。台灣基於能源種類來源多元化、環境保護、減少對石化能源之依賴與開發永久性能源的觀點而言，發展太陽能與風能等綠能科技已成為政府目前之施政重點。由於太陽能與風能均會隨著自然條件如太陽光強度及風速等之變化而變化，而太陽能發電與風力發電具有互補之特點，因此非常適合將其整合應用，期望能有助於提升再生能源發電量之穩定。依據 2015 World Wind Energy Association (WWEA) [6]與金屬工業中心之資料[7]顯示全球有十幾個國家有小型風電之固定價格之收購機制，WWEA[6]之報告顯示至 2013 年全球裝設之小型風機組已超過 87 萬組，至於國內依據核能研究所之資料顯示雖然國內小型風力機裝置量較低，但若以出貨量來看，臺灣僅次於中國、美國與英國，位居全球第四位[8]，由此可見國內於小型風力機仍然有相當之發展潛力。因此，有必要積極發展包含電能轉換介面等相關之風力發電核心技術，以擴展小型風力發電機之應用與開發。台灣於太陽能產業之矽晶圓與電池之製造與產量皆僅次於中國，位居全球第二位，相當有發展潛力。由於太陽能與風力發電之不穩定性與間歇性，目前已有許多論文探討太陽能與風力發電與電池儲能結合以增加發電穩定性[9-18]，本論文將探討直流耦合式獨立型電能轉換界

面之運轉策略，並將進行電腦模擬以驗證所發展之整合風力、太陽能與電池儲能之直流耦合式電能轉換界面於獨立運轉下之功能。

## 2. 電能轉換界面架構

整合風力、太陽能與電池儲能發電系統之直流耦合式獨立型電能轉換界面之電路架構如圖 1 所示。其係由一小型風力發電機、一太陽能電池陣列、一電池組、一升壓直流-直流電能轉換器、一雙向直流-直流電能轉換器、一交流-直流電能轉換器及一雙向直流-交流電能轉換器所組成，太陽能電池陣列及電池組分別經由升壓直流-直流電能轉換器及雙向直流-直流電能轉換器連接到共用直流匯流排，而小型風力發電機經由交流-直流電能轉換器連接到共用直流匯流排，共用直流匯流排並經由一共用之雙向直流-交流電能轉換器連接至交流匯流排供電給負載。由於電池組單獨之雙向直流-直流電能轉換器連接至直流匯流排，在實際應用上電池組所需之電池串聯數量較有彈性，且電池組之充放電較容易控制而可延長電池組之壽命，由圖 1 可發現風能與太陽能經直流匯流排對電池組充電只須經兩級電能轉換器，所以系統之充電效率較高。此架構為風能、太陽能與電池儲能於直流匯流排連接至一共用之直流-交流電能轉換器，使整個電能轉換界面僅包含四個電能轉換器，電路架構最簡單，而硬體成本較低。

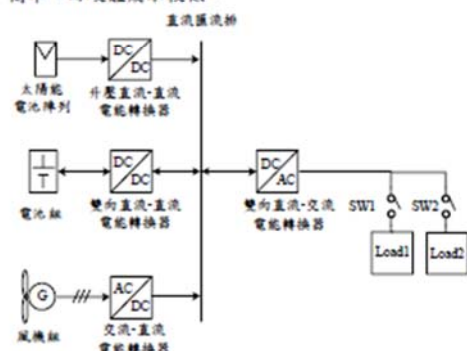


圖 1 整合風力、太陽能與電池儲能之發電系統之直流耦合式獨立型電能轉換界面之電路架構。

圖 2 為整合風力、太陽能與電池儲能發電系統之直流耦合式獨立型電能轉換界面之電路。由圖 2 可看出與太陽能電池陣列連接之直流-直流電能轉換器為一升壓型直流-直流電能轉換器，與電池組連接之直流-直流電能轉換器為一雙向升降壓型直流-直流電能轉換器，基於成本考慮目前之小型風力發電機之交流-直流電能轉換器大都採用由一三相二極體整流器與一升壓直流-直流電能轉換器組成之交流-直流電能轉換器；由於此系統之小型風力發電之永磁式同步發電機其容量僅為 1KW，因此採用由一三相二極體整流器與一升壓直流-直流電能轉換器組成之交流-直流電能轉換器。而與市電及負載連接之雙向直流-交流電能轉換器為一改良式雙向五階直流-交流電能轉換器。傳統之單相 T-型五階之交流-交流電能轉換器係由兩個 T-型臂共八個開關所組

成，而本論文採用之改良式單相五階直流-交流電能轉換器係由一個 T-型臂與一個傳統電力電子臂共六個開關所組成，因此可省下兩個開關。

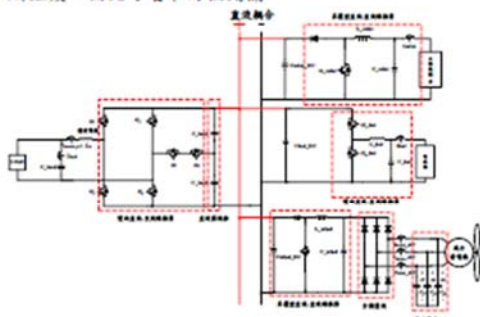


圖 2 整合風力、太陽能與電池儲能發電系統之直流耦合式獨立型電能轉換界面之電路。

## 3. 控制策略

獨立運轉時依據交流端負載大小及電池的蓄電量決定電池充放電與風力及太陽能是否放棄 MPPT；如電池進行充電，電池之充電電流由風力發電與太陽能為提供給負載消耗後之剩餘電力決定，在此情況下，電能轉換界面具有備用電源供應器之功能。獨立運轉可區分為六種工作模式，如圖 3 至圖 8，電池組充電時有三種工作模式分別為模式一、模式二及模式三，當電池組充飽電及交流負載為零時電能轉換器操作在模式四熱機狀態，在電池組放電時有兩種工作模式分別為模式五及模式六。獨立運轉下之工作模式轉換可依據直流匯流排之電壓大小進行判斷；表 1 為不同工作模式所對應之直流匯流排之電壓

表 1 不同工作模式所對應之直流匯流排之電壓

模式	直流匯流排電壓(V)	電池組充電/放電	直流匯流排穩壓轉換器
一	403	電池組充電	電池組之雙向直流-直流電能轉換器
二	406	電池組充電	太陽能之直流-直流電能轉換器限功率模式
三	413	電池組充電	太陽能之直流-直流電能轉換器停止運作 風力之直流-直流電能轉換器限功率模式
四	417	無	太陽能及風力直流-直流電能轉換器熱機 電池組之雙向直流-直流電能轉換器熱機
五	400	電池組放電	電池組之雙向直流-直流電能轉換器
六	395	電池組放電	電池組之雙向直流-直流電能轉換器

### 3.1 電池組充電

模式一：

當風力及太陽能發電產生之功率大於負載消耗之功率，而此時電池組尚未充飽，風力及太陽能之發電提供負載後之多餘功率將對電池充電，風光電發電系統之直流耦合式獨立型電能轉換介面之功率潮流如圖 3 所示。

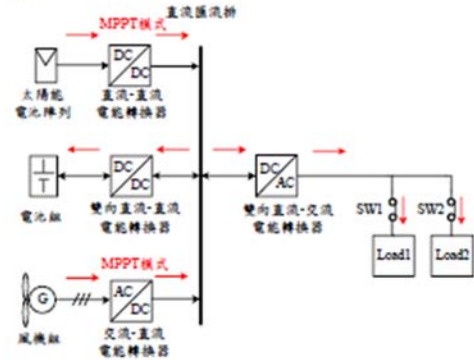


圖 3 整合風光電發電系統之直流耦合式獨立型電能轉換介面模式一。

模式二：

當風力及太陽能發電產生之功率大於負載消耗之功率時，此時如電池組接近充飽，多餘的風力及太陽能產生之功率無法完全由電池吸收，太陽能放棄 MPPT 模式，進入限功率模式，風光電發電系統之直流耦合式獨立型電能轉換介面之功率潮流如圖 4 所示。

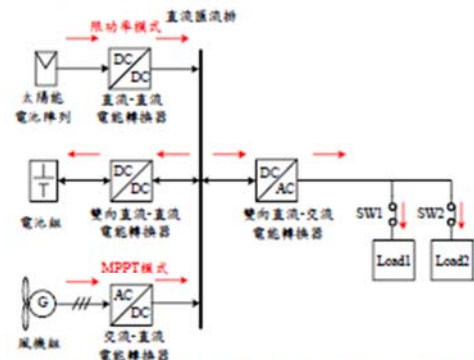


圖 4 整合風光電發電系統之直流耦合式獨立型電能轉換介面模式二。

模式三：

當風力產生之功率大於負載消耗之功率時，此時如電池組接近充飽，多餘的風力無法完全由電池吸收，太陽能停止發電而風力發電放棄 MPPT 模式，進入限功率模式，風光電發電系統之直流耦合式獨立型電能轉換介面之功率潮流如圖 5 所示。

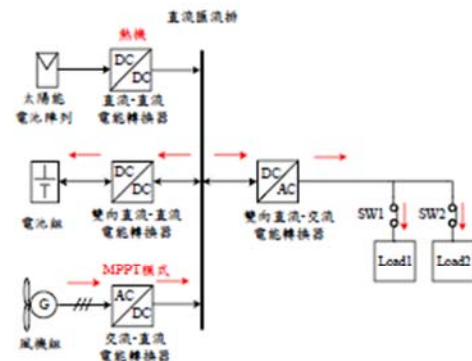


圖 5 整合風光電發電系統之直流耦合式獨立型電能轉換介面模式三。

### 3.2 熱機

模式四：

當無載情況發生時，此時電池組充電至額定電壓 270V，風力發電產生之多餘功率無法由電池吸收，風力與太陽能之直流-直流電能轉換器熱機，風光電發電系統之直流耦合式獨立型電能轉換介面之功率潮流如圖 6 所示。

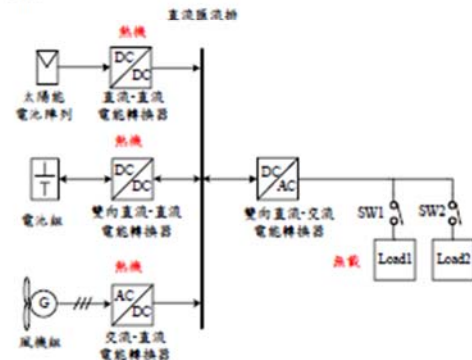


圖 6 整合風光電發電系統之直流耦合式獨立型電能轉換介面模式四。

### 3.1 電池組放電

模式五：

當風力及太陽能發電產生之功率小於負載消耗之功率時，此時電池組如尚未放電至保護電壓 200V，則進行放電提供風力及太陽能不足之功率來共同供應負載，風光電發電系統之直流耦合式獨立型電能轉換介面之功率潮流如圖 7 所示。

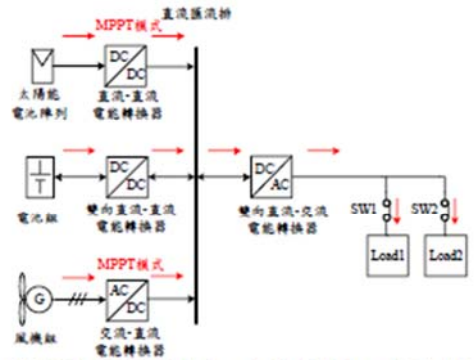


圖7 整合風光發電系統之直流耦合式獨立型電能轉換介面模式五。

模式六：

當風力及太陽能發電產生之功率小於負載消耗之功率時，此時當電池組放電至保護電壓 200V，則直流匯流排電壓會下降至卸載設定值 395V，進行卸載；當將部分負載卸除後，風力及太陽能發電產生之多餘功率無法由負載消耗完，使直流匯流排電壓上升至 403V，電池組進行定電壓充電模式，將多餘的風力及太陽能功率由電池組吸收，轉成模式一之工作模式。風光發電系統之直流耦合式獨立型電能轉換介面之功率潮流如圖 8 所示。

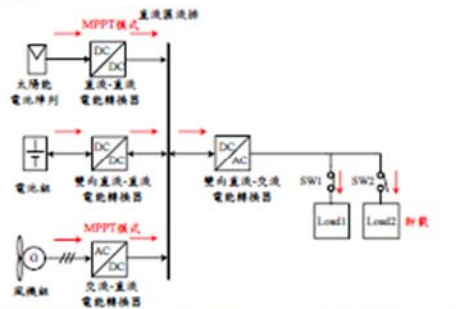


圖8 整合風光發電系統之直流耦合式獨立型電能轉換介面模式六。

4. 模擬結果

為驗證本論文所發展之直流耦合式獨立型電能轉換界面之運轉策略，本論文將利用 PSIM 模擬軟體進行電腦模擬。

圖 9 顯示模式五轉變為模式一之模擬結果，由模擬結果可看出 1.5 秒時風力及太陽能進行 MPPT 且於 2.2 秒時運轉在最大功率點，此時直流匯流排電壓由電池組之雙向直流-直流電能轉換器進行穩壓，其穩壓方式為將雙向直流-直流電能轉換器操作為一升壓型電能轉換器穩壓至 400V，當風力及太陽能產生之功率大於負載之功率時，直流匯流排電壓會上升至 403V，此值為電池充電模式之電壓設定值，此時電池開啟充電模式，並由雙向直流-直流電能轉換器穩壓至 403V，其穩壓方式為當直流匯流排電壓大於 403V，開始進行電池充電；直流

匯流排電壓小於 403V，關閉電池充電模式，以上動作重複至太陽能與風力輸出功率、負載消耗之功率與電池充電吸收之功率間達到功率平衡，並維持模式一之工作模式。

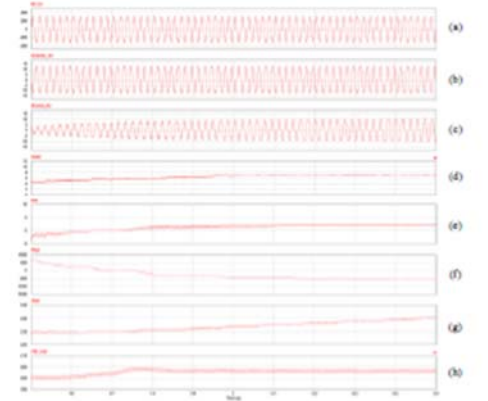


圖9 模式五轉變為模式一之模擬結果，(a) $V_{load}$ ，(b) $i_{inverter}$ ，(c)  $i_{Rwind\_AC}$ ，(d) $i_{solar}$ ，(e) $i_{bat}$ ，(f) $P_{bat}$ ，(g) $V_{bat}$ ，(h)  $V_{dc\_bus}$ 。

圖 10 顯示模式一轉變為模式二之模擬結果，由模擬結果可看出 3.47 秒前為模式一工作模式電壓穩壓在 403V 並對電池組進行充電，在 3.47 秒後當電池組電壓充電至額定電壓 270V 時，改成電池定電壓充電模式，此時太陽能及風能產生之功率大於負載與電池組所能吸收之功率，直流匯流排電壓會上升至太陽能限功率設定值 406V，將太陽能之直流-直流電能轉換器放棄 MPPT 模式，進入限功率模式，並由太陽能之直流-直流電能轉換器將直流匯流排電壓穩壓至 406V，其穩壓方式為當直流匯流排電壓大於 406V，減少直流-直流電能轉換器之責任週期；當直流匯流排電壓低於 406V，增加直流-直流電能轉換器之責任週期，以上動作重複至太陽能與風力輸出功率、負載消耗之功率與電池充電吸收之功率間達到功率平衡，並維持模式二之工作模式。

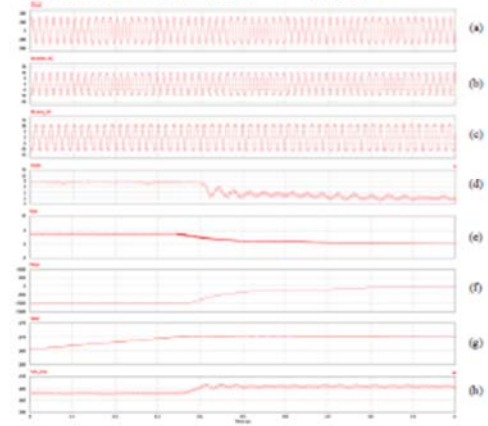


圖 10 模式一轉變成模式二之模擬結果，(a) $V_{load}$ ，(b) $i_{inverter\_AC}$ ，(c) $i_{Rwind\_AC}$ ，(d) $i_{solar}$ ，(e) $i_{bat}$ ，(f) $P_{bat}$ ，(g) $V_{bat}$ ，(h) $V_{dc\_bus}$ 。

圖 11 顯示模式一轉變成模式二再轉變成模式三之模擬結果，由模擬結果可看出在 2.13 秒前電池組進行定電壓充電模式，直流匯流排電壓在 403V，此時為模式一的工作模式；當電池組在 2.13 秒時電池組充電接近額定電壓 270V，風力及太陽能發電產生之多餘功率無法完全由電池組吸收，太陽能先放棄 MPPT 模式，進入限功率模式，電池組進行定電壓充電模式，在 2.6 秒前直流匯流排電壓在 406V，此時為模式二的工作模式；2.6 秒後太陽能停止發電，風力發電產生之多餘功率仍使直流匯流排上升，當直流匯流排上升至風力限功率設定值 413V，將風力之直流-直流電能轉換器放棄 MPPT 模式，進入風力限功率模式，並由風力之直流-直流電能轉換器將直流匯流排電壓穩壓至 413V，其穩壓方式為當直流匯流排電壓大於 413V，減少直流-直流電能轉換器之責任週期；當直流匯流排電壓低於 413V，增加直流-直流電能轉換器之責任週期，以上動作重複至風力輸出功率、負載消耗之功率間達到功率平衡，並維持模式三之工作模式。

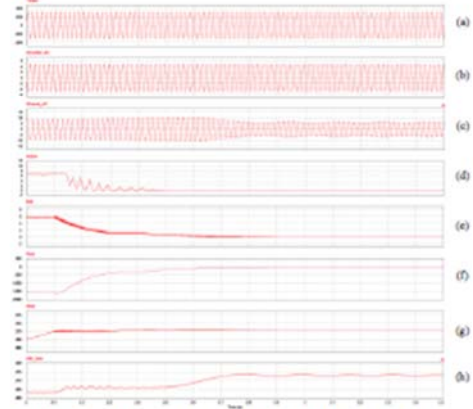


圖 11 模式一轉變成模式二再轉變成模式三之模擬結果，(a) $V_{load}$ ，(b) $i_{inverter\_AC}$ ，(c) $i_{Rwind\_AC}$ ，(d) $i_{solar}$ ，(e) $i_{bat}$ ，(f) $P_{bat}$ ，(g) $V_{bat}$ ，(h) $V_{dc\_bus}$ 。

圖 12 顯示模式三轉變成模式四再轉變成模式三之模擬結果，由模擬結果可看出 3.5 秒前為模式三，3.5 秒時遇到無載的情況，直流匯流排會由 413V 上升至停機設定值 417V，此時風力及太陽能之直流-直流電能轉換器以及電池組之雙向直流-直流電能轉換器皆為熱機情況為模式四，直流匯流排電壓會因電路損耗緩緩由 417V 下降，並在 4.4 秒時電壓降至 413V，此時風力之直流-直流電能轉換器會啟動，將電壓穩壓至 413V 維持模式三，此時依舊為無載情況。

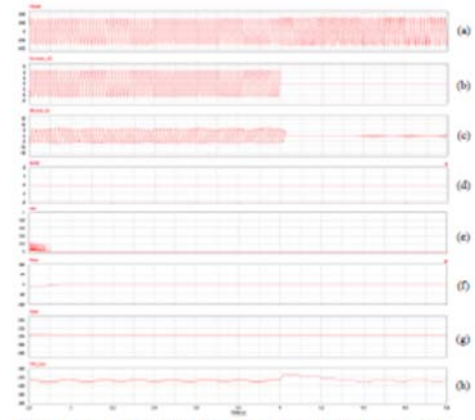


圖 12 模式三轉變成模式四再轉變成模式三之模擬結果，(a) $V_{load}$ ，(b) $i_{inverter\_AC}$ ，(c) $i_{Rwind\_AC}$ ，(d) $i_{solar}$ ，(e) $i_{bat}$ ，(f) $P_{bat}$ ，(g) $V_{bat}$ ，(h) $V_{dc\_bus}$ 。

圖 13 模式五之模擬結果，由模擬結果可看出 1.6 秒至 2.1 秒期間由於直流匯流排電壓未高於電池充電之電壓設定值 403V，表示直流匯流排須由電池組之雙向直流-直流電能轉換器來進行穩壓至 400V，最後負載消耗功率與風力及太陽能及電池組提供功率間達到功率平衡，並維持模式五工作模式。

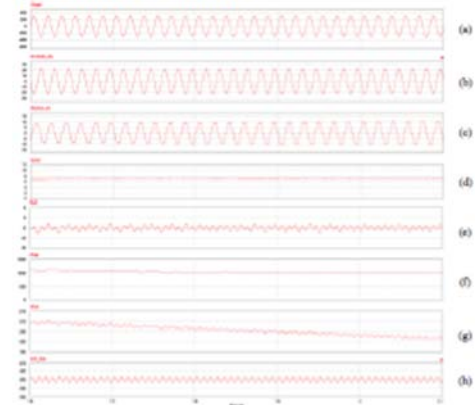


圖 13 模式五之模擬結果，(a) $V_{load}$ ，(b) $i_{inverter\_AC}$ ，(c) $i_{Rwind\_AC}$ ，(d) $i_{solar}$ ，(e) $i_{bat}$ ，(f) $P_{bat}$ ，(g) $V_{bat}$ ，(h) $V_{dc\_bus}$ 。

圖 14 顯示模式五轉變成模式六再轉變成模式一之模擬結果，由模擬結果可看出 2.15 秒前為模式五工作模式，由風力及太陽能及電池組共同提供負載消耗，當電池組放電至保護電壓 200V 時，關閉電池組之穩壓模式來保護電池避免過放，此時風力及太陽能功率不足以提供負載消耗，在 2.16 秒時直流匯流排電壓會下降至卸載設定值 395V，進行卸載工作模式六，將部分負載卸除後，風力及太陽能發電產生之多餘功率無法由負載消耗完，使直流匯流排電壓上升至 403V，電池組進行定電

流充電模式，將多餘的風力及太陽能功率由電池組吸收，並維持在模式一之工作模式。

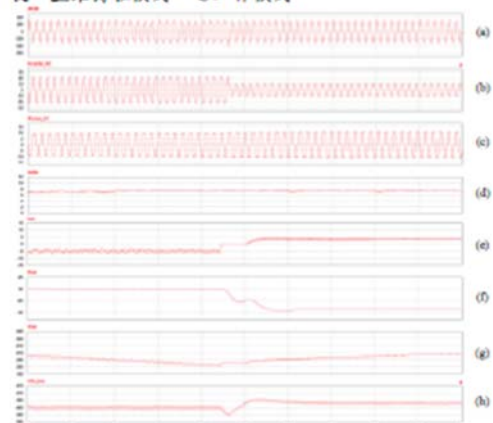


圖 14 模式五轉變成模式六再轉變成模式一之模擬結果。(a) $V_{load}$ 、(b) $i_{inverter\_AC}$ 、(c) $i_{kwind\_AC}$ 、(d) $i_{solar}$ 、(e) $i_{bat}$ 、(f) $P_{bat}$ 、(g) $V_{bat}$ 、(h) $V_{dc\_bus}$ 。

## 5. 結論

整合風光發電系統之直流耦合式獨立型電能轉換介面可區分為六種工作模式，獨立運轉下之工作模式之轉換可依據直流匯流排之電壓大小進行判斷，電池組充電時有三種工作模式，而在電池組充電及交流負載趨近於零時有一種工作模式，此模式下電能轉換器處於熱機狀態，在電池組放電時亦有兩種工作模式。為驗證所發展之直流耦合式電能轉換界面於獨立運轉下之功能，利用 PSIM 模擬軟體進行電腦模擬，模擬結果證實其可達到預期之性能。

## 6. 誌謝

感謝行政院原子能委員會核能研究所於經費上之支持，使本論文得以順利完成；本論文為「行政院原子能委員會核能研究所委託辦理，惟報告內容不代表原能會意見」。

## 參考文獻

- [1] D. Pendergast, "Kyoto and Beyond: Development of Sustainable Policy", IEEE EIC Climate Change Technology, 2006, pp. 1-3.
- [2] J. Arai, K. Iba, T. Funabashi, Y. Nakamishi, K. Koyanagi, and R. Yokoyama, "Power electronics and its applications to renewable energy in Japan", IEEE Circuits and Systems Magazine, Vol. 8, 2008, pp. 52-66.
- [3] 葉惠身, "我國的水續能源政策", 綠色關鍵技術與研發環境建構, 2008.
- [4] 黃奕傑, "全國能源會議後我國能源發展之布局及策略"台灣經濟研究月刊,第 38 卷第 6 期, pp.17-17, 2015.
- [5] [http://www.ndc.gov.tw/Content\\_List.aspx?n=9D024A4424DC36B9&cupn=6E972F5C30BF198F](http://www.ndc.gov.tw/Content_List.aspx?n=9D024A4424DC36B9&cupn=6E972F5C30BF198F).
- [6] Stefan Gsänger and Jean-Daniel Pitteloud, 2015 Small Wind World Report Summary, World Wind Energy Association, 2015.

- [7] 宋承穎, "全球小型風力機測試認證現況與發展", IT IS 產業評析, 2015.
- [8] 鄭景木, 林彥廷, 蘇建年, 黃金斌, "小型風力機之國際應用趨勢及其國內研發技術現況", 臺灣能源期刊, 第三卷, 第一期, 第 117-126 頁.
- [9] P.Manimekalai, R.Harikumar, S.Raghavan "An Overview of Batteries for Photovoltaic (PV) Systems". International Journal of Computer Applications, Vol. 82, No 12, Nov., 2013, pp. 28-32.
- [10] Francisco Diaz-Gonzalez, Andreas Sumper, Oriol Gomis-Bellmunt, Roberto Villafañila-Robles, "A review of energy storage technologies for wind power applications," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, pp. 2154-2172.
- [11] Marcelo Godoy Simões, Tiago Davi Curi Busarello, Abdullah Saad Bubshait, Farnaz Harirchi, José Antenor Pomilio, Frede Blaabjerg, "Interactive smart battery storage for a PV and wind hybrid energy management control based on conservative power theory", International Journal of Control, Vol.89, No.4, 2016, pp. 850-870.
- [12] Tarek M. Masaud, Keun Lee, P. K. Sen, "An overview of energy storage technologies in electric power systems: What is the future?", North American Power Symposium (NAPS), 2010, 26-28 September, pp.1-6.
- [13] S. Kumaravel, S. Ashok, "Optimal Power Management Controller for a Stand-alone Solar PV/Wind/Battery Hybrid Energy System" Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, Vol.37, 2015, pp.407-415.
- [14] Farzam Nejabatkhah, Yun Wei Li, "Overview of Power Management Strategies of Hybrid AC/DC Microgrid," IEEE Power Electronics Society, Vol.30, No.12, 2014, pp.7072-7089.
- [15] Rashid Al Badwawi, Mohammad Abusara, Tapas Mallick, "A Review of Hybrid Solar PV and Wind Energy System," Smart Science, Vol.3, 2015, pp.127-138.
- [16] Fengge Zhang, Xuanyi Chen, Xiaojun Yin, Zhaosheng Wang, "An Improved Capacity Ratio Design Method Based on Complementary Characteristics of Wind and Solar", Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2013, pp.405-408.
- [17] F. Valenciaga and P. F. Puleston, "Supervisor Control for a Stand-Alone Hybrid Generation System Using Wind and Photovoltaic Energy", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, Issue 2, 2005, pp. 398 - 405.
- [18] Ye Zhang, Hong Jie Jia, Li Guo, "Energy management strategy of islanded microgrid based on power flow control", IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2012, pp.1-8.