

行政院原子能委員會  
委託研究計畫研究報告

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：1052001INER023

受委託機關(構)：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

研究期程：中華民國 105 年 4 月至 105 年 12 月

研究經費：新臺幣 46 萬元

核研所聯絡人員：林彥廷 博士

報告日期：2016 年 11 月 20 日

## 目 錄

目 錄.....	I
中文摘要.....	1
ABSTRACT.....	2
壹、計畫緣起與目的.....	3
一、計畫緣起.....	3
二、計畫目的.....	4
貳、研究方法與過程.....	5
一、電路系統架構.....	5
(一)、風力機之三相 T-型多階交流-直流電能轉換器.....	5
(二)、市電併網之三相 T-型多階直流-交流電能轉換器.....	8
二、模擬結果.....	17
(一)、25KW 風力發電機模擬結果.....	17
(二)、150KW 風力發電機模擬結果.....	21
參、主要發現與結論.....	25
肆、參考文獻.....	26

## 中文摘要

本報告利用 PSIM 模擬軟體針對使用永磁式同步風力發電機之 25kW 與 150kW 風力發電系統之電能轉換界面進行模擬。風力發電系統之電能轉換界面包含與永磁式同步風力發電機併聯之交流-直流轉換級及與市電併聯之直流-交流轉換級；報告中之交流-直流及直流-交流轉換級均採用 T-型多階電能轉換器，交流-直流轉換級將控制風力發電機產生近似弦波之平衡三相電流，使其接近單位功因，並將風力發電機產生之不穩定交流電能轉換成直流電能，再利用直流-交流轉換級將直流電能轉換成高功因低諧波之高品質交流電流注入電力系統，並將最大功率追蹤與孤島運轉偵測之功能整合至控制器中，使該電能轉換界面具有最大功率追蹤與孤島運轉偵測之功能。模擬結果證明其可達到預期之效果。

## **Abstract**

Permanent magnet synchronous generator (PMSG) has been widely used in the applications of wind power generation, respectively. In this report, the power conversion interface of 25kW and 150kW wind power generation system will be simulated based on PSIM. The power conversion interface consists of a AC-DC power stage and a DC-AC power stage. The T-type multi-level power converter is adopted to implement both AC-DC power stage and DC-AC power stage. The AC-DC power converter stage is used to control the PMSG outputting three-phase balanced sinusoidal currents, and the DC bus voltage is expected to be a constant value although the output of the output voltage and frequency of PMSG are variable. The grid-connected DC-AC inverter stage is expected to control the current fed into the utility grid to be sinusoidal and in phase with the utility voltage. In addition, the function of maximum power point tracking (MPPT) and islanding detection is incorporated into the controller. Hence, the power conversion interface performs the functions of MPPT and islanding detection. The simulation results are as expected.

## 壹、計畫緣起與目的

### 一、計畫緣起

過去數十年人類過度的使用煤、石油與天然氣等石化能源，大量排放溫室氣體造成全球暖化，其所引發之全球氣候變遷的問題日趨嚴重，並已形成地球生態浩劫[1-3]。為防止氣候變遷的問題更加嚴重，各國漸漸開始重視能源運用與溫室氣體排放等相關議題。各國於 1997 年 12 月於日本京都所召開會議制定之「京都議定書」[4]，其規範主要為締約國在 2008 年至 2012 年間需控制溫室氣體排放量低於 1990 年排放量之減少 5.2%。在 2015 年 12 月於法國巴黎舉行之 2015 聯合國氣候峰會訂定出協議以加強京都議定書之相關協議，主要目標為期盼在本世紀結束前全球均溫上升不超過攝氏 2 度、提高對氣候變化不利影響之應變能力、以不影響糧食生產之方式進行強化對氣候抗禦力與溫室氣體減少排放之發展...等[5,6]。

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等挑戰，於民國 104 年月 1 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、開源需求與環境低碳永續[7]。基於能源種類與來源多元化、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，台灣發展再生能源已成為不可避免之趨勢，風能為再生能源重要來源之一，如果能夠有效利用風能，不但可以解決能源需求的問題，更可以減少環境汙染及降低全球之溫室效應。

多階電能轉換器為近年來發展出來的電路架構，可降低電力電子開關每一次切換的電壓，多階電能轉換器相較於傳統電能轉換器，不僅可有效減小輸出之交流諧波電壓，並可減小電力電子開關之耐壓，有效降低電力電子開關產生之切換損失及電磁干擾，並可藉由更換較低導通內阻之電力電子開關以減小導通損失，因此多階電能轉換器可有效提升效率、降低輸出諧波及減小濾波器容量。

## 二、計畫目的

台灣風力資源豐富，而為達到供給穩定、開源需求與環境低碳永續之目標，風力發電之發展已成為政府施政之重要政策。台灣海峽有世界級優良風場，而由中央山脈至台灣海峽間之狹道有著較佳的條件具備離岸風力發展潛力。相較於陸域風力發電而言，廣大面積的海域更能提供平穩的風力發電，而且台灣陸域風力發電也幾乎已經發展飽和，因此發展海上風力發電已經是勢在必行[8]。

風力發電機所產生之電壓，其振幅及頻率均會隨著風力而改變，因此無法直接併聯至電力系統，必需藉由一電能轉換界面將風力發電機產生之不穩定的三相交流電能轉換成與電力系統電壓同相位、同頻率之三相電能方能饋入電力系統。

本計畫發展之電能轉換界面包含與永磁式同步風力發電機併聯之交流-直流轉換級及與市電併聯之直流-交流轉換級，兩個電能轉換級均採用 T-型多階電能轉換器，交流-直流轉換級將風力發電機產生之三相交流電流控制為近似弦波之三相平衡電流，且達到單位功因，並將風力發電機產生之不穩定交流電能轉換

成直流電能，再利用與市電併聯之直流-交流轉換級將直流電能轉換成高功因低諧波之高品質交流電流注入電力系統，並將最大功率追蹤與孤島運轉偵測之功能整合至控制器中，使該電能轉換界面具有最大功率追蹤與孤島運轉偵測之功能。

## 貳、研究方法與過程

### 一、電路系統架構

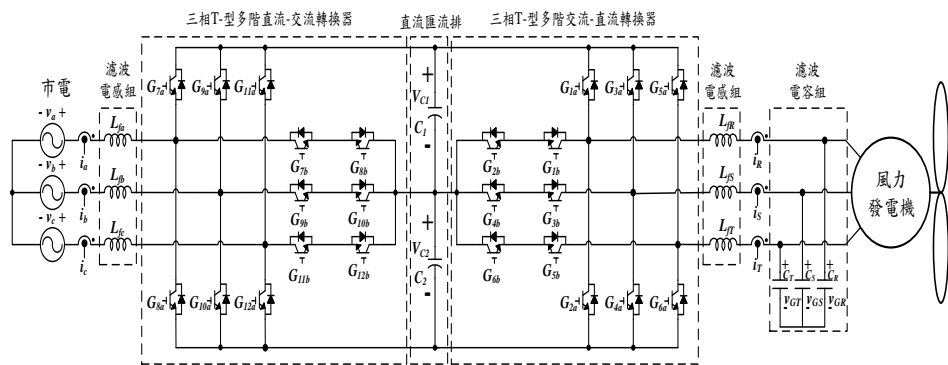


圖 1 三相永磁同步風力發電系統電能轉換界面之電路架構

圖 1 為本研究之三相永磁同步風力發電系統電能轉換界面之電路架構。其係由一三相 T 型交流-直流電能轉換器及一三相 T 型直流-交流電能轉換器所組成，本計畫之研究重點為風力發電系統之交流-直流電能轉換及直流-交流電能轉換之技術，因此風力發電機之運轉條件將限制在其輸出電壓振幅較接近市電電壓振幅之範圍。

#### (一)、風力機之三相 T-型多階交流-直流電能轉換器

一般的風力發電系統，在交流電能轉換成直流電能時，通常使用三相二極體整流器，因此在發電機側會有很高的電流諧

波，對發電機有下列之不良影響，如產生脈動轉矩造成機械震動、產生噪音、減少機械效率，而諧波電流會使鐵損與銅損增加，造成發電機容易過熱，因機械震動及過熱將會減短發電機壽命[11]，因此如何降低發電機側的電流諧波為一重要課題。

風力發電機輸出電壓之振幅與頻率會隨著風速改變，圖 1 中將一 T-型三相多階交流-直流轉換器連至接風力發電機輸出端，為了能有效利用風力發電機產生之電能，風力發電機之電流必需控制為高功率因數與低諧波失真，如果採用傳統電流控制式，則需產生和風力發電機各相電壓之頻率與相位相同之參考信號，然而如果採用鎖相迴路來對風力發電機端之電壓進行鎖相以產生參考信號，需要考慮到鎖相迴路之響應速度，當風能在迅速變化之時，鎖相迴路在與風力發電機端電壓同步上可能會有較大難度，而使得參考信號與風力發電機端電壓之相位及頻率產生誤差，進而使得風力發電機之功率因數降低，造成風能利用率降低，因此在本報告中採用虛擬電阻法進行 T-型三相多階交流-直流轉換器之控制[11,24]。

如圖 1 所示，風力發電機產生之三相交流電流經濾波器組後送入三相 T 型交流-直流轉換器，藉由三相 T 型交流-直流轉換器將風力發電機產生之交流電能進行轉換。本文中之風力發電機之交流-直流轉換控制係採用電流前饋控制法。

三相 T 型交流-直流電能轉換器可視為一放大器，其放大倍率  $K_{converter}$  為：

$$K_{converter} = \frac{V_{dc}}{2\hat{V}_{carrier}} \quad (1)$$

其中  $V_{dc}$  為三相 T 型交流-直流轉換器直流端電壓， $\hat{V}_{carrier}$  為脈



波寬度調變信號之三角載波振幅。

若將檢出之風力發電機之各相電流作為前饋控制信號，則各相脈波寬度調變信號可表示為：

$$v_R(t) = K_{control} \times i_R(t) \quad (2)$$

$$v_S(t) = K_{control} \times i_S(t) \quad (3)$$

$$v_T(t) = K_{control} \times i_T(t) \quad (4)$$

其中  $i_{R,S,T}$  為風力發電機各相輸出電流、 $v_{R,S,T}$  為三相 T 型交流-直流轉換器各相脈波寬度調變信號、 $K_{control}$  為控制變數。

整合上述之式子，三相 T 型交流-直流電能轉換器經脈波寬度調變控制後之輸出電壓  $v_{GR}(t)$ 、 $v_{GS}(t)$ 、 $v_{GT}(t)$  為：

$$v_{GR}(t) = K_{converter} \times K_{control} \times i_R(t) \quad (5)$$

$$v_{GS}(t) = K_{converter} \times K_{control} \times i_S(t) \quad (6)$$

$$v_{GT}(t) = K_{converter} \times K_{control} \times i_T(t) \quad (7)$$

式(5)至(7)簡化後可得式(8)至(10)：

$$v_{GR}(t) = K_{VR} \times i_R(t) \quad (8)$$

$$v_{GS}(t) = K_{VR} \times i_S(t) \quad (9)$$

$$v_{GT}(t) = K_{VR} \times i_T(t) \quad (10)$$

由式中可看出三相 T 型交流-直流電能轉換器之輸出電壓與風力發電機輸出電流成正比，因此三相 T 型交流-直流電能轉換器可等效成三相平衡純電阻並聯至風力發電機輸出，由於它不是真正的電阻，因此將其稱之為虛擬電阻，其電阻值為  $K_{VR}$ ；因此風力發電機之各相輸出電流能自動與其端電壓之頻率及相位均相同，因此可達到單位功因。圖 2 為採用虛擬電阻法之三相 T 型交流-直流電能轉換器之控制方塊，其中電阻控制信

號之輸入可控制虛擬電阻大小。

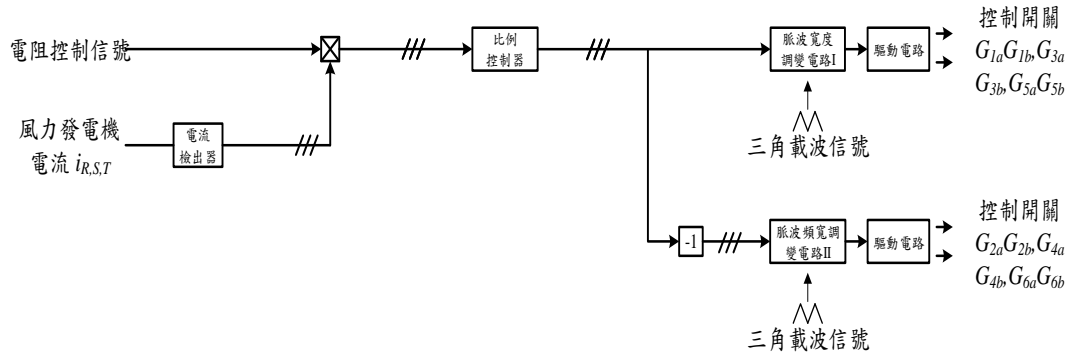


圖 2 三相 T 型交流-直流電能轉換器之控制方塊

## (二)、市電併網之三相 T-型直流-交流電能轉換器

圖 1 所示之三相 T-型直流-交流轉換器其直流匯流排電容電壓需大於輸入市電電壓之峰值且穩定於一定值[25]。圖 3 為三相 T 型直流-交流多階電能轉換器之控制方塊，其控制目標為直流匯流排電容電壓與三相輸出電流，首先檢出電容  $C_1$  之電壓  $V_{C1}$  與電容  $C_2$  之電壓  $V_{C2}$ ，再將兩者相加作為直流匯流排電壓之回授訊號  $V_{dc\_bus}$ ， $V_{dc\_bus}$  與直流匯流排電壓設定值相減，再經過如式(11)之比例積分控制器(Proportional Integration, PI)，比例積分控制器之轉移函數  $H(S)$  為：

$$H(s) = K_p + \frac{K_I}{S} \quad (11)$$

其中  $K_p$  與  $K_I$  分別為比例與積分控制參數，其可補償電壓誤差值、加快系統暫態響應速度和消除穩態時穩態誤差，達到控制直流匯流排電容電壓穩壓之效果。為了完成電容  $C_1$  之電壓  $V_{C1}$  與電容  $C_2$  之電壓  $V_{C2}$  之均壓，將電容  $C_1$  之電壓  $V_{C1}$  與電容  $C_2$  之電壓  $V_{C2}$  相減得到電壓誤差修正信號，比例積分控制器之輸

出與各相之單位弦波相乘並與電容電壓誤差修正信號相加後，可分別得到與三相市電電壓同步之電流參考信號  $i_{L_R}^*$ 、 $i_{L_S}^*$ 、 $i_{L_T}^*$ ，此三相電流參考信號分別與各相電流經電流檢出器後之信號相減，經放大後可得到各相之控制信號  $i_{con\_R}$ 、 $i_{con\_S}$ 、 $i_{con\_T}$ ，再將各相控制信號分別送至脈波寬度調變電路與三角載波比較後，產生一頻率為 20 kHz 之脈波寬度調變訊號，將其送至驅動電路以驅動功率開關；另外，此各相控制信號送至增益為 1 之反向放大器，再分別送至脈波寬度調變電路與反相 180° 之三角載波比較後，產生一頻率為 20 kHz 之脈波寬度調變訊號，並送至驅動電路以驅動功率開關。

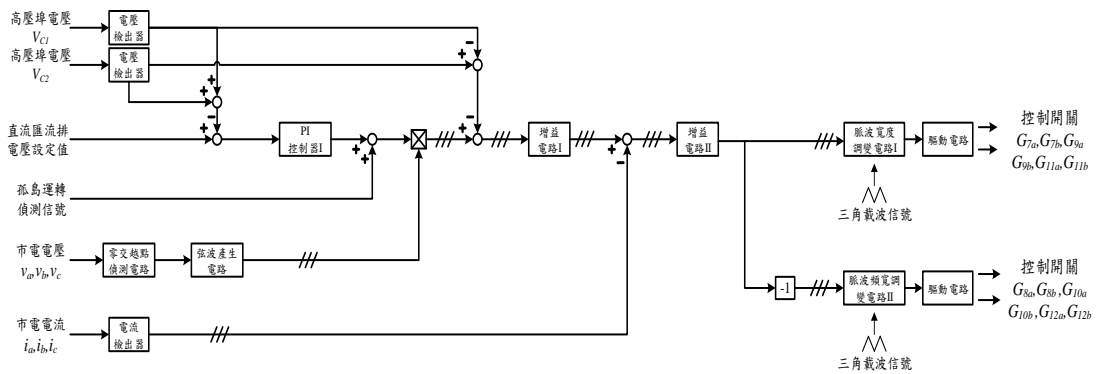


圖 3 併網之三相 T-型多階直流-交流電能轉換器之控制方塊

三相 T-型多階直流-交流電能轉換器採用之 SPWM 切換技術如圖 4 所示，由三相各差 120° 之正弦波控制信號  $V_{controlR}$ 、 $V_{controlS}$ 、 $V_{controlT}$  與兩相位相差 180° 且具電位極性相反之三角載波  $V_{carrier1}$ 、 $V_{carrier2}$  作比較。其中三角載波之振幅為  $\hat{V}_{carrier}$ ，頻率為  $f_s$ ， $f_s$  決定直流-交流電能轉換器功率開關之切換頻率，正弦波控制信號之頻率  $f_l$  決定直流-交流電能轉換器之輸出

電壓頻率，而其振幅  $\hat{V}_{controlR}$ 、 $\hat{V}_{controlS}$ 、 $\hat{V}_{controlT}$  決定直流-交流電能轉換器輸出電壓之大小。定義振幅調制指數  $m_a$  為（以 R 相為例）[25]:

$$m_a = \frac{\hat{V}_{controlR}}{2\hat{V}_{carrier}} \quad (12)$$

而頻率調制指數  $m_f$  則定義為:

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (13)$$

當在線性調制區 ( $m_a \leq 1.0$ ) 之情況，其輸出電壓之基本波大小與  $m_a$  成線性正比，假設  $m_f$  很大， $V_{controlR}$  於一切換週期可假設為定值，而其 R 相相電壓基頻峰值為:

$$(\hat{V}_{RN})_1 = m_a \frac{V_{dc}}{2} \quad (14)$$

因此線對線電壓之基本波均方根值為:

$$(V_{LLR})_1 = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} (\hat{V}_{RN})_1 = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_a V_{dc} \cong 0.612 m_a V_{dc} \quad (15)$$

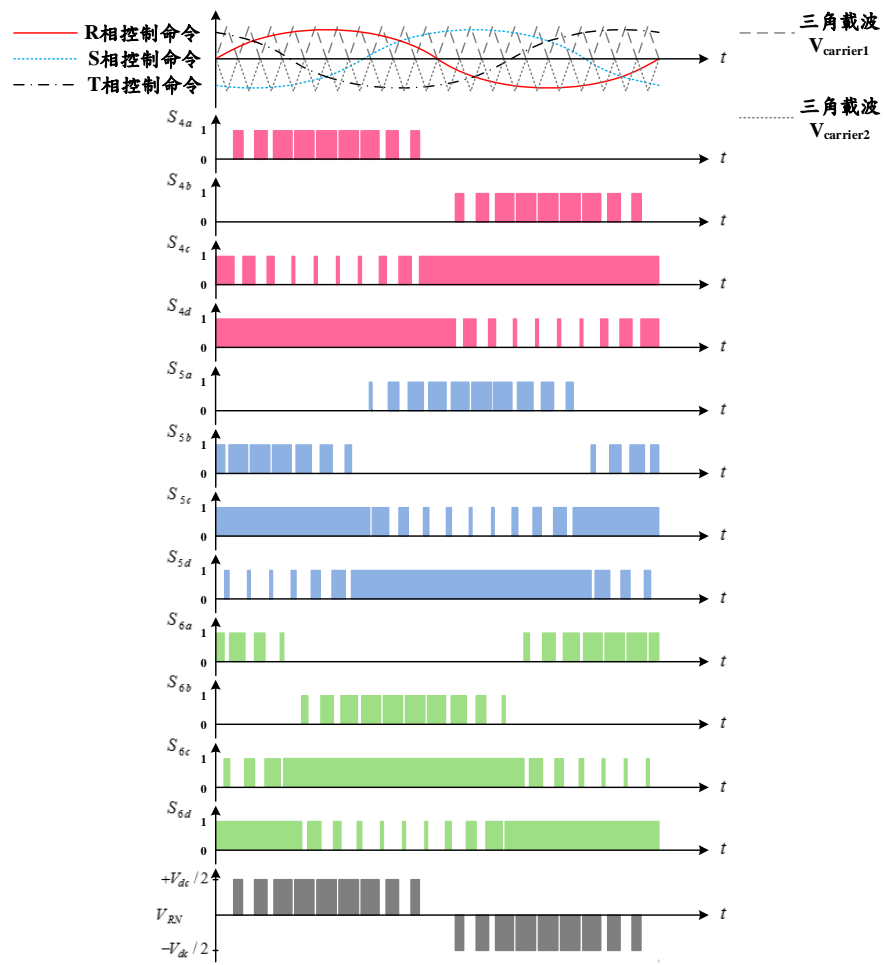


圖 4 三相 T-型多階直流-交流電能轉換器之控制時序圖

### (1) 最大功率追蹤控制

風力發電系統其所產生之電力在一特定風速下會隨其轉速而改變，且在每一個特定風速下，均存在一最大功率點，為了充分利用風能，電能轉換界面必需具有最大功率追蹤功能[9,10,22,23]，以期能從風力發電機擷取最大電能。

假設三相永磁同步風力發電系統電能轉換界面為無損失之理想狀態，風力發電機之輸出功率即等同於輸出饋入至市電之功率。

假設市電系統為三相平衡系統，因此只針對 R 相作分析，市電系統 R 相電壓  $v_R$  為：

$$v_R(t) = V_R \sin(\omega t) \quad (16)$$

其中  $V_R$  為市電相電壓之振幅， $\omega$  為市電系統頻率。

而電能轉換界面 R 相輸出電流  $i_R$  為弦波且與市電電壓同相位，其可表示為

$$i_R(t) = I_R \sin(\omega t) \quad (17)$$

其中  $I_R$  為電能轉換界面 R 相輸出電流之振幅。則電能轉換界面輸出之實功率為：

$$P_{out} = 3V_R I_R / 2 \quad (18)$$

因市電端之電壓係由電力系統直接供應，而市電電壓瞬間之振幅變動量不大，可視為一恆定電壓源，在饋入市電之電流與市電電壓相位相同時，可將電能轉換界面輸出電流振幅之變化看成風力發電系統產生之實功變化，因此僅需取樣電能轉換界面輸出電流振幅即可判斷當前風力發電

系統輸出功率，因此本計畫中所採用的最大功率追蹤法為一不需計算功率之擾動觀察法[10]。圖 5 為本文之擾動觀察法流程圖，先擾動三相 T 型交流-直流電能轉換器之虛擬電阻，觀察饋入市電電流之振幅變化以決定下一次擾動虛擬電阻之方向，以達到風力發電機之最大功率追蹤 [10]。

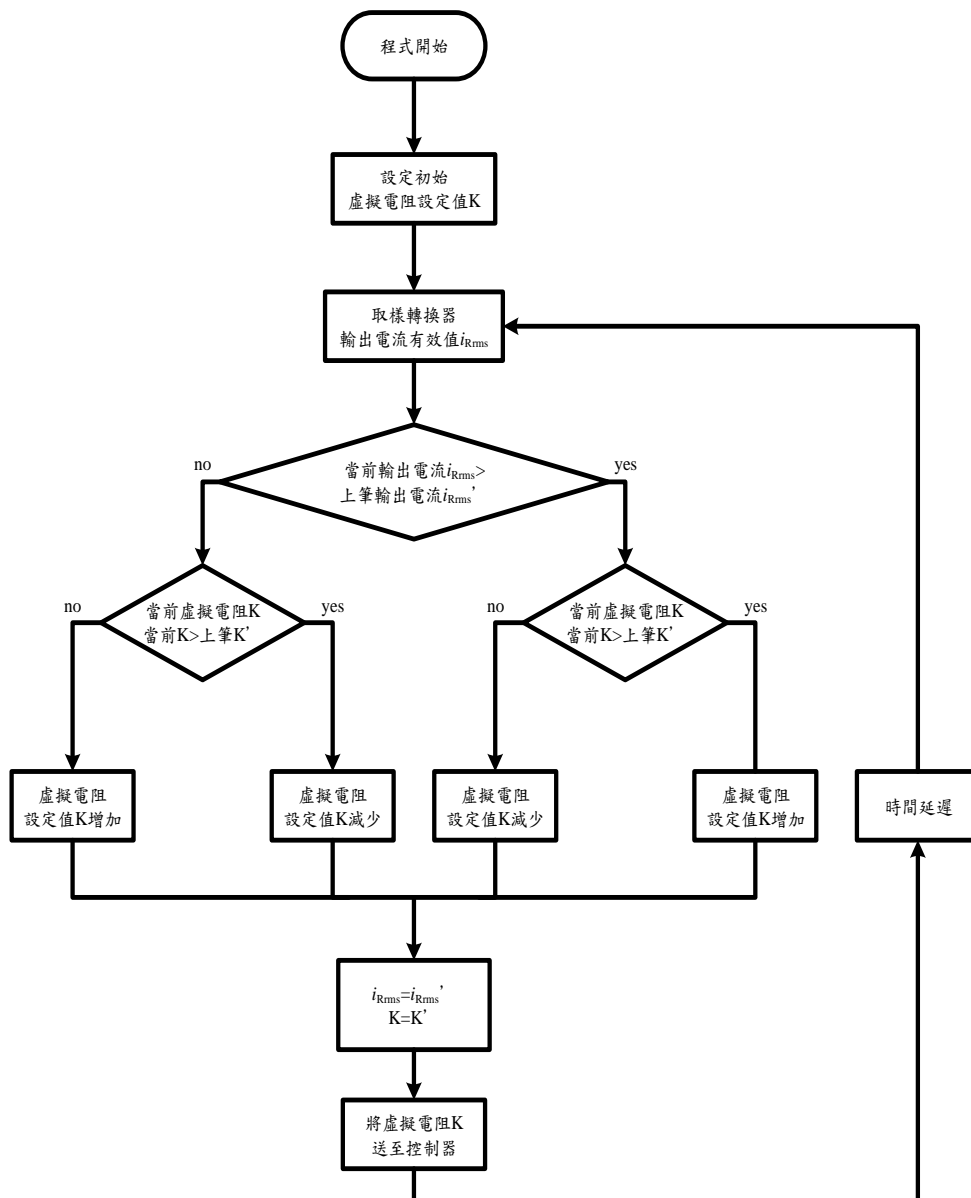


圖 5 不需計算功率之最大功率追蹤之流程圖

(2)孤島偵測—市電電流偵測法：

分散式發電系統之容量如低於 500kW 必需具有孤島運轉偵測之功能[9]，期能在市電斷電時能儘速檢出並終止孤島運轉，否則不論對供電系統或受電用戶都可能造成不利的影響，甚至危害民眾以及電力公司輸電線路維修人員之安全[12-21]。

本文採用的孤島偵測為市電電流偵測法[21]。圖 6 為用於孤島偵測之電流偵測法之之示意圖。依照克西荷夫電流定律，當風力發電產生之電能與市電端負載達到平衡時，則此時電能轉換界面輸出電流與市電端負載電流近乎相同，電力系統輸入電流近似於零；當電力系統輸入電流近似於零時，電能轉換界面產生一擾動信號，如擾動後，電力系統輸入電流不再近似於零，則可判斷為市電正常；反之，如擾動後，仍近似於零，則可判斷為市電斷電。

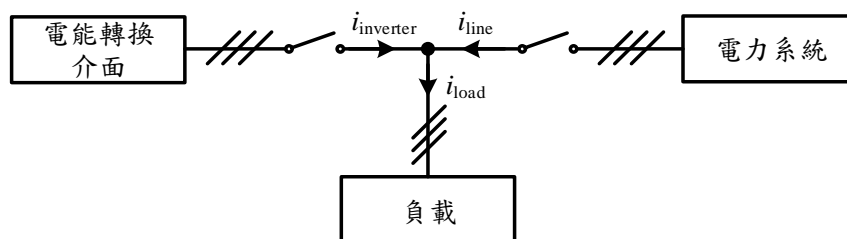


圖 6 用於孤島偵測之電流偵測法之示意圖

圖 7 所示為市電電流偵測法控制流程圖。程式開始後，控制器進行取樣電力系統輸入電流，將電力系統輸入電流取絕對值得到  $|i_{line}|$ ，進行判斷當前電力系統輸入電流絕對值  $|i_{line}|$  是否大於預先設定值  $I_{set}$ 。在電力系統輸入電流絕對值  $|i_{line}|$  大於設定值  $I_{set}$  下，則表示此時電能轉換界面輸出之功率未與負載消耗之功率達到平衡，並表示電力系統仍可



以供給或饋回電流，未發生電力系統斷電狀態，因此不必投入擾動信號；當電力系統輸入電流絕對值 $|i_{line}|$ 小於設定值 $I_{set}$ ，可能發生功率平衡或電力系統斷電狀態，為偵測是否發生斷電，電能轉換界面產生一方波(70Hz)擾動信號，加入擾動信號使目前電能轉換界面產生之功率與負載所消耗之功率不平衡。加入擾動信號後，再次判斷電力系統輸入電流絕對值 $|i_{line}|$ 是否大於設定值 $I_{set}$ 。若電力系統輸入電流絕對值 $|i_{line}|$ 大於設定值 $I_{set}$ ，表示經擾動後迫使電能轉換界面輸出之電流不等於負載電流，藉此可偵測出電力系統未斷電，僅是功率平衡狀態，電能轉換界面可持續運轉，重新回到程式開始後取樣電力系統輸入電流步驟；若在投入擾動信號量後，電力系統輸入電流經偵測後仍小於 $I_{set}$ ，則偵測出電能轉換界面發生孤島運轉，立即停止電能轉換界面運轉，並切離電力系統。

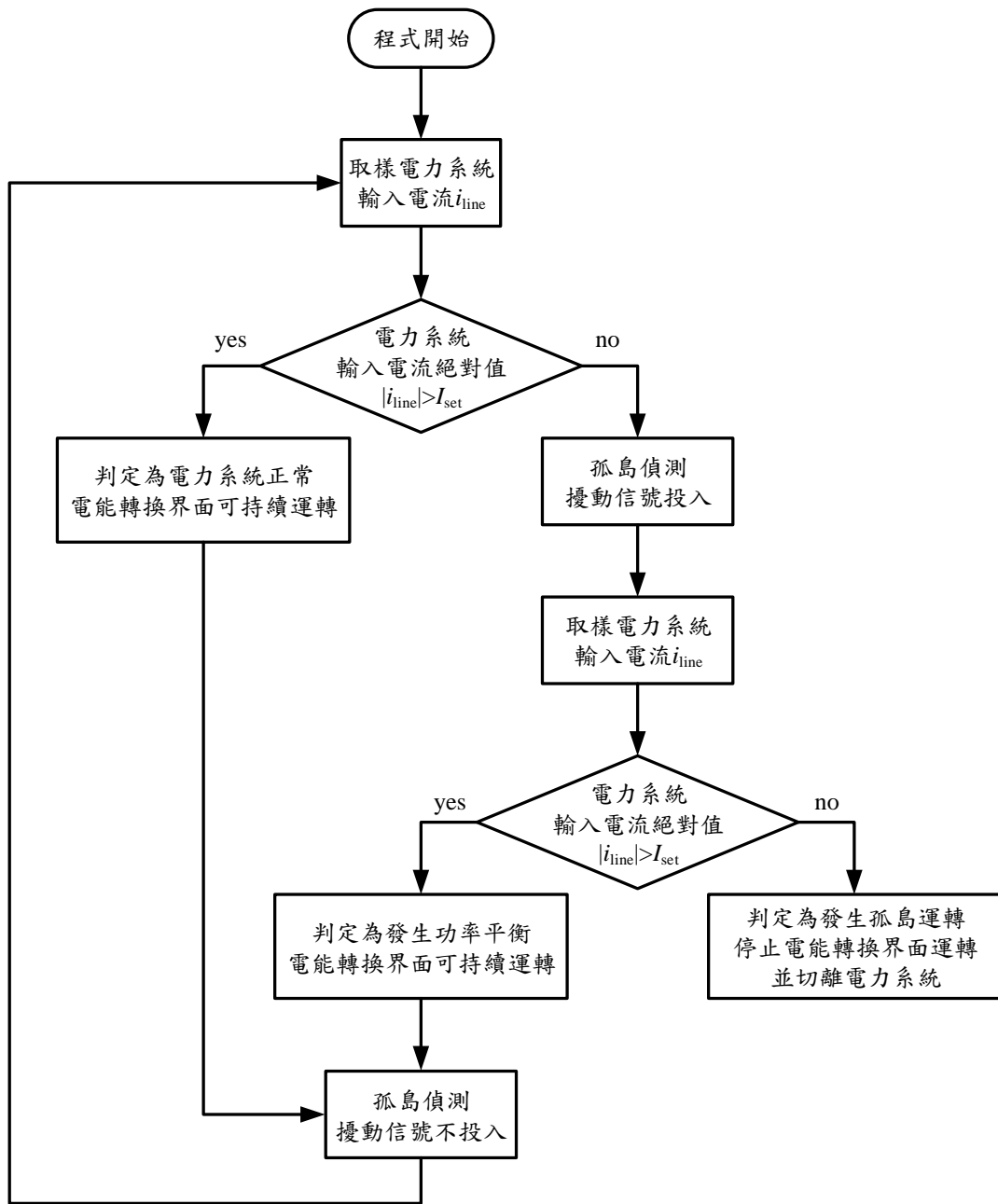


圖 7 用於孤島偵測之電流偵測法之流程圖

## 二、模擬結果

本研究中以一 25kW 與一 150kW 永磁式同步風力發電機模型分別帶入電能轉換界面進行整合模擬分析以驗證本文之永磁式同步風力發電機之三相 T 型電能轉換介面之性能。

### (一)、25KW 風力發電機模擬結果

圖 8 為轉速 228RPM 下最大功率為 25kW 風力發電機進行最大功率追蹤之模擬結果，圖 8(a)  $W_{\text{windout}_1}$  為風力發電機進行功率掃描測試曲線與  $W_{\text{windout}_2}$  為進行最大功率追蹤控制之功率曲線，由模擬結果可看出電能轉換界面確實可以控制風力發電機追蹤至轉速 228RPM 下所產生之最大功率，圖 8(b) 為轉速，圖 8(c) 為最大功率追蹤控制下風力發電機之 R 相電壓與 R 相電流波形，圖 8(d) 為最大功率追蹤控制下市電端之 R 相電壓與 R 相電流波形。

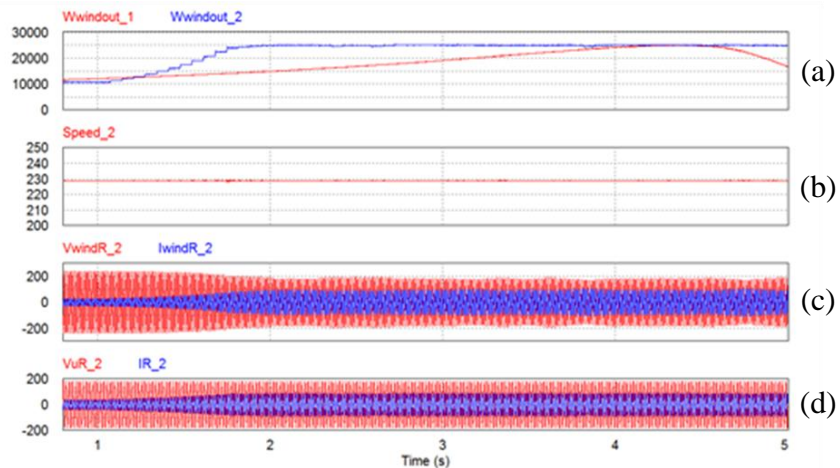


圖 8 轉速 228RPM 下進行最大功率追蹤之模擬結果，(a)風力發電機進行功率測試曲線與進行最大功率追蹤曲線，(b)轉速，(c)風力發電機之 R 相電壓與電流波形，(d) 市電之 R 相電壓與輸出電流波形。

圖 9 為擷取轉速 228RPM 下進行最大功率追蹤之電壓與電流波形放大顯示圖，圖 9(a)為風力發電機之相電壓與相電流波形，圖 9(b)市電端之相電壓與輸出相電流波形，由圖 9 可看出風力發電機輸出電流可控制為接近弦波並且達到高功因之成效，而輸出電流亦可控制為與市電電壓相位相同之弦波，可達到高功因，因實功率為饋入市電中，因此電壓與電流呈現反相。

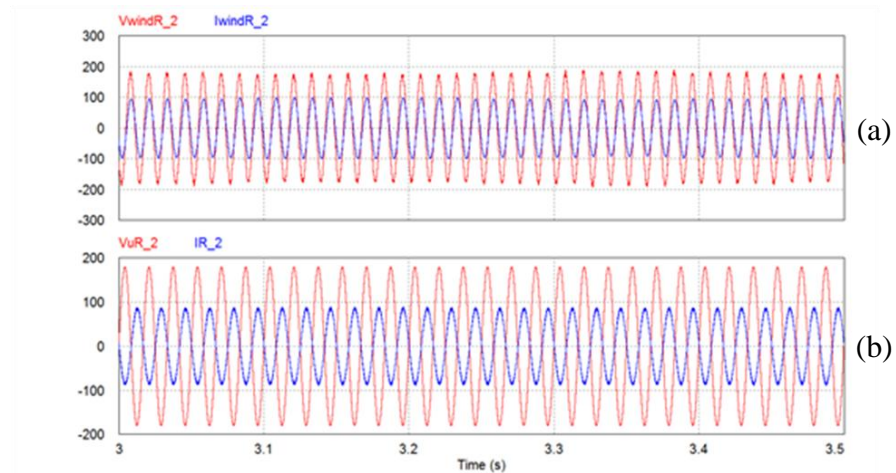


圖 9 轉速 228RPM 下進行最大功率追蹤之 R 相電壓與電流波形，(a)風力發電機之電壓與電流波形，(b) 市電電壓與輸出電流波形。

圖 10、11 為轉速 184RPM 下最大功率為 20kW 之風力發電機進行最大功率追蹤之模擬結果，由模擬結果可看出電能轉換界面確實得以控制風力發電機追蹤至轉速 184RPM 下所產生之最大功率，且風力發電機輸出電流可控制為接近弦波並且達到高功因之成效，而輸出電流亦可控制為與市電電壓相位相同之弦波，可達到高功因。

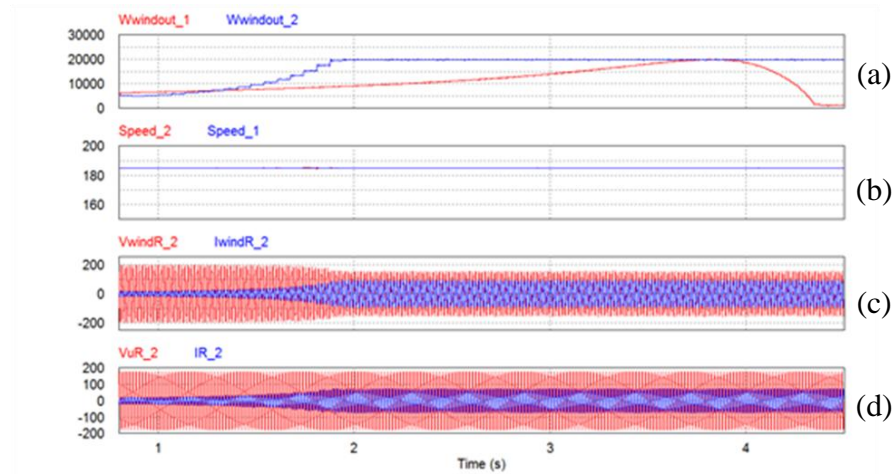


圖 10 轉速 184RPM 下進行最大功率追蹤之功率曲線圖，(a) 風力發電機進行功率測試曲線圖與進行最大功率追蹤曲線圖，(b)轉速，(c)風力發電機之 R 相電壓與電流波形，(d)R 相市電電壓與 R 相輸出電流波形。

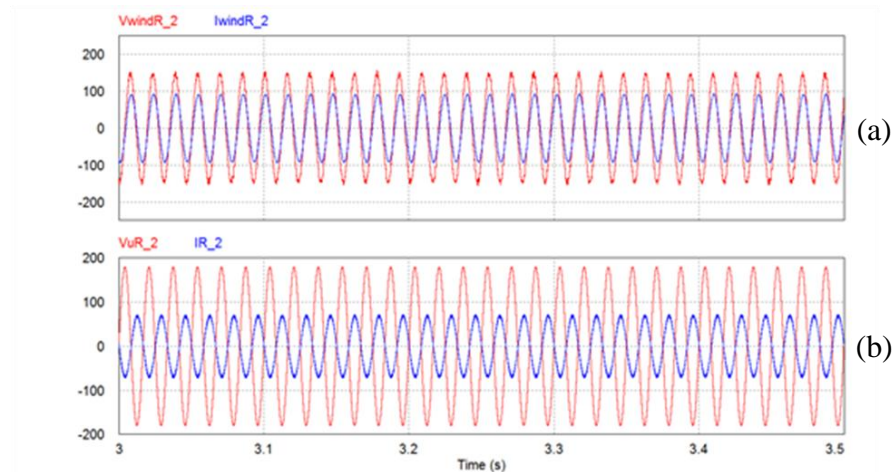


圖 11 轉速 184RPM 下進行最大功率追蹤之 R 相電壓與電流波形，(a)風力發電機之電壓與電流波形，(b) 市電電壓與輸出電流波形。

圖 12 為進行孤島偵測之模擬結果，圖中 1.2 秒至 1.3 秒為市電正常且未發生功率平衡狀態，而在 1.3 秒至 1.5 秒為市電正常且發生功率平衡之狀態，此時電能轉換界面產生一額外擾動信號進行擾動，電力系統輸入電流變大，判定為市電正常，

於 1.5 秒時市電中斷發生孤島運轉，電力系統輸入電流經擾動後仍持續為零，經偵測後於 1.5 週內電能轉換界面停止運轉，此模擬測試負載為  $R=1.58$ 、 $L=1.678\text{mH}$ 、 $C=4.19\text{mF}$ ，R-L-C 負載之品質因數  $Q=2.5$ 。由圖中可知此方法可達到孤島運轉之功能。

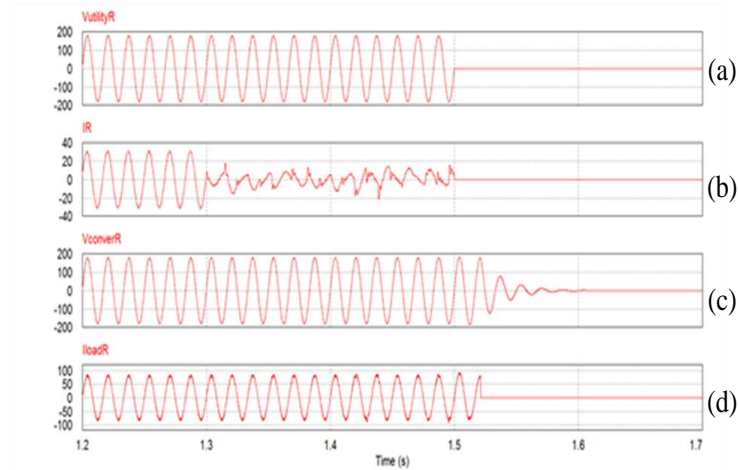


圖 12 R 相孤島運轉偵測功能之模擬結果，(a)市電電壓波形，(b)市電輸入電流波形，(c) 電能轉換界面之輸出電壓波形，(d) R-L-C 負載電流波形。

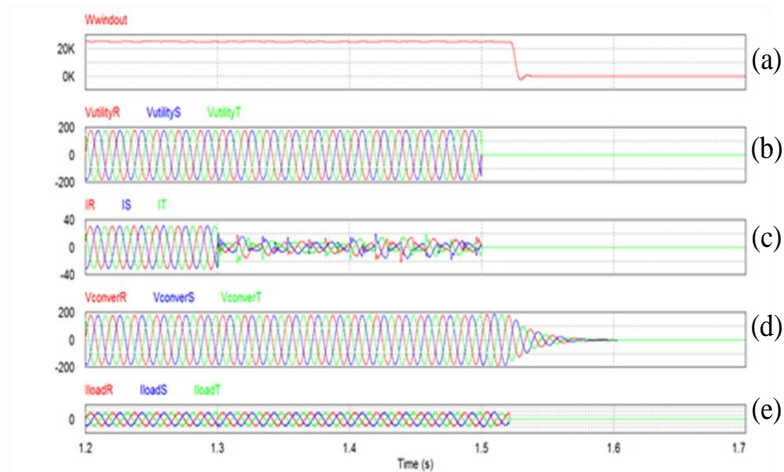


圖 13 三相孤島運轉偵測功能之模擬結果，(a)風力發電機之輸出功率，(b) 三相市電電壓波形，(c)三相市電輸入電流波形，(d)三相電能轉換界面之輸出電壓波形，(e)三相 R-L-C 負載相電流波形。

圖 13 為三相孤島運轉偵測功能之模擬。圖 13 與圖 12 之條件相同，但是顯示完整三相電壓與電流波形。

## (二)、150KW 風力發電機模擬結果

圖 14 為轉速 743RPM 下最大功率為 150kW 風力發電機進行最大功率追蹤之模擬結果，圖 15(a)  $W_{\text{windout}_1}$  為風力發電機進行功率掃描測試曲線與  $W_{\text{windout}_2}$  為進行最大功率追蹤控制之功率曲線，由模擬結果可看出電能轉換界面確實可以控制風力發電機追蹤至轉速 743RPM 下所產生之最大功率，圖 15(b) 為轉速，圖 15(c) 為最大功率追蹤控制下風力發電機之 R 相電壓與 R 相電流波形，圖 15(d) 為最大功率追蹤控制下 R 相市電電壓與 R 相輸出電流波形。

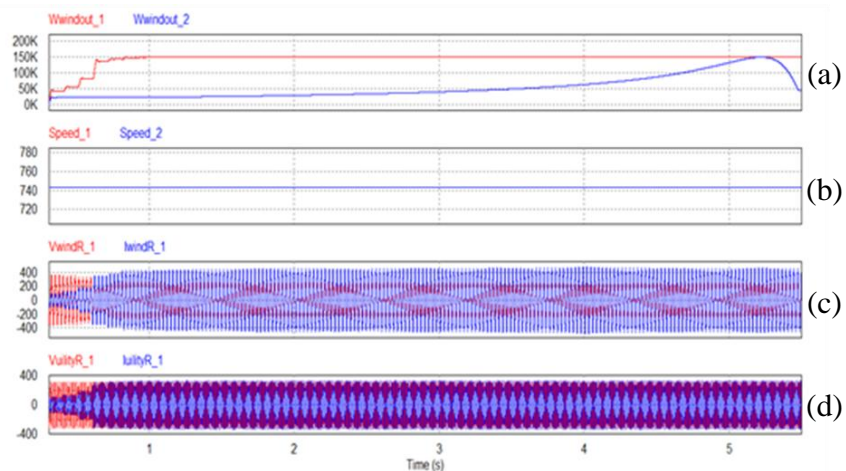


圖 14 轉速 743RPM 下進行最大功率追蹤之模擬結果，(a)風力發電機進行功率測試曲線與進行最大功率追蹤曲線，(b)轉速，(c)風力發電機之 R 相電壓與電流波形，(d) R 相市電電壓與輸出電流波形。

圖 15 為擷取轉速 743RPM 下進行最大功率追蹤之電壓與電流波形放大顯示圖，圖 15(a) 為風力發電機之 R 相電壓與電

流波形，圖 15(b)市電端之 R 相相電壓與 R 相輸出電流波形，由圖 15 可看出風力發電機輸出電流可控制為接近弦波並且達到高功因之成效，而市電端電流亦可控制為與電壓相位相同之弦波，達到高功因，因實功率為饋入市電中，因此電壓與電流呈現反相。

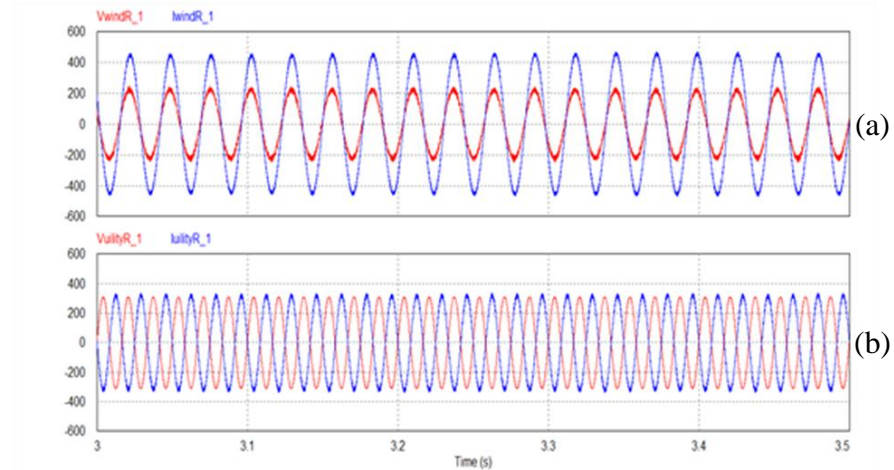


圖 15 轉速 743RPM 下進行最大功率追蹤之電壓與電流波形，(a)風力發電機之 R 相電壓與電流波形，(b) 市電電壓與輸出電流波形。

圖 16、17 為轉速 621RPM 下最大功率為 120kW 之風力發電機進行最大功率追蹤之模擬結果，由模擬結果可看出電能轉換界面確實得以控制風力發電機追蹤至轉速 621RPM 下所產生之最大功率，且風力發電機輸出電流可控制為接近弦波並且達到高功因之成效，而市電端電流亦可控制為與電壓相位相同之弦波，達到高功因。



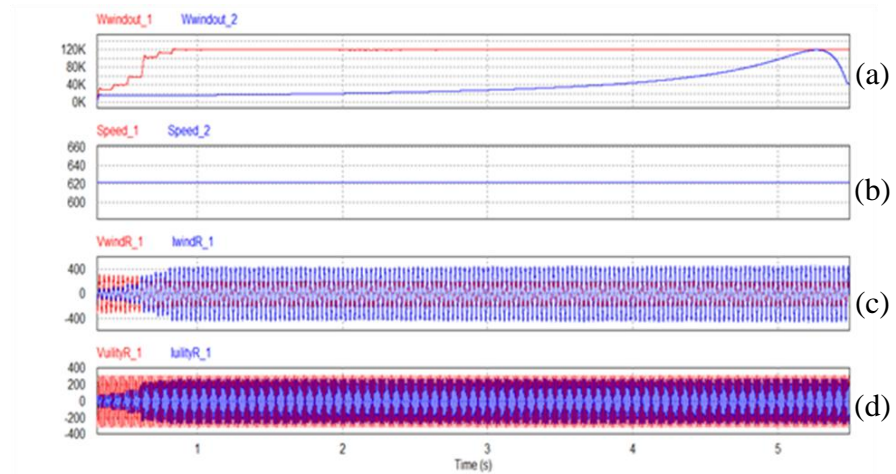


圖 16 轉速 621RPM 下進行最大功率追蹤之功率曲線圖，(a) 風力發電機進行功率測試曲線圖與進行最大功率追蹤曲線圖，(b)轉速，(c)風力發電機之 R 相電壓與電流波形，(d)市電端之 R 相電壓與 R 相輸出電流波形。

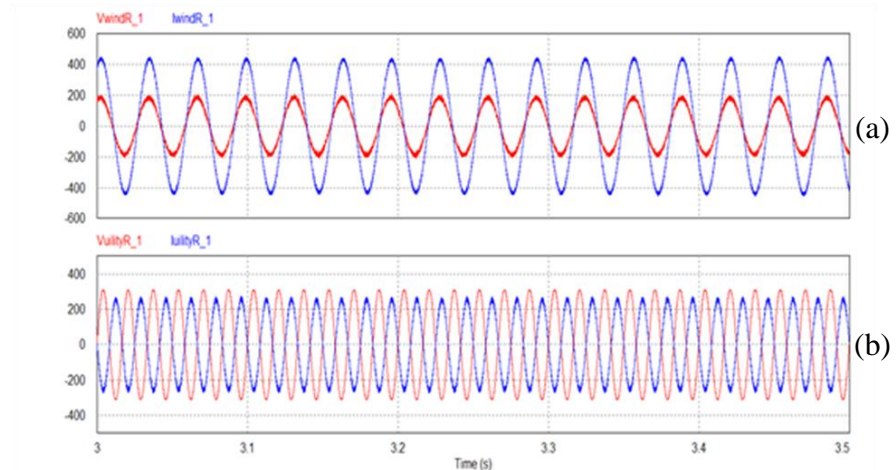


圖 17 轉速 621RPM 下進行最大功率追蹤之電壓與電流波形，(a)風力發電機之 R 相電壓與電流波形，(b) R 相市電電壓與輸出電流波形。

圖 18 為進行孤島偵測模擬，圖中 1 秒至 1.5 秒為市電正常且未發生功率平衡狀態，而在 1.5 秒至 2 秒為市電正常且發生功率平衡之狀態，此時電能轉換界面產生一額外擾動信號進行擾動，電力系統輸入電流變大，判定為市電正常，於 2 秒時

市電中斷發生孤島運轉，電力系統輸入電流經擾動後仍持續為零，經偵測後於 1.5 週內電能轉換界面停止運轉，此模擬測試負載為  $R=0.968\Omega$ 、 $L=1.027\text{mH}$ 、 $C=6.85\text{mF}$ ，R-L-C 負載之品質因數  $Q=2.5$ 。由圖中可知此方法可達到孤島運轉之功能。

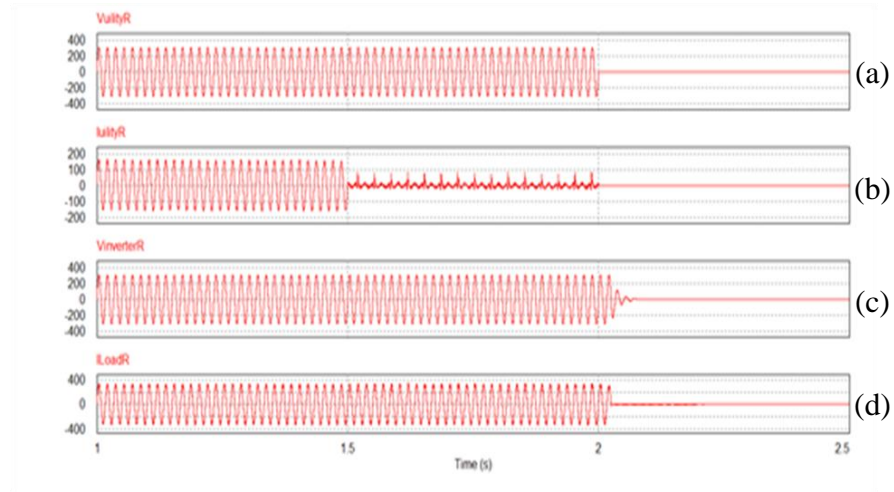


圖 18 R 相孤島運轉偵測功能之模擬結果，(a)市電電壓波形，(b)市電輸入電流波形，(c) 電能轉換界面之輸出電壓波形，(d) R-L-C 負載電流波形。

圖 19 為三相孤島運轉偵測功能之模擬。圖 19 與圖 18 之條件相同，但是顯示完整三相電壓與電流波形。

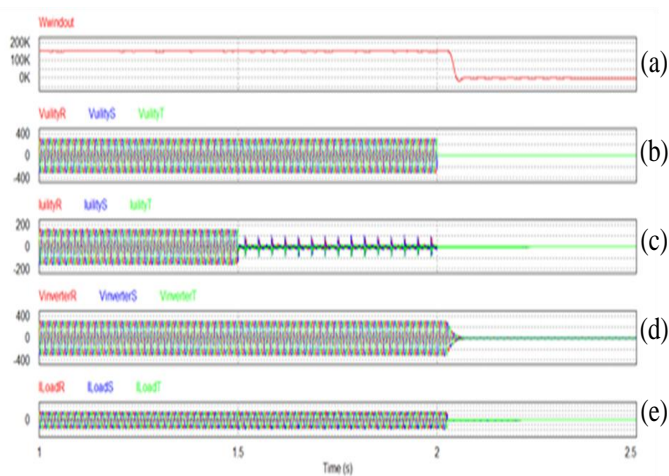


圖 19 三相孤島運轉偵測功能之模擬結果，(a)風力發電機之輸

出功率，(b) 三相市電電壓波形，(c)三相市電輸入電流波形，(d)三相電能轉換界面之輸出電壓波形，(e)三相 R-L-C 負載相電流波形。

### 參、主要發現與結論

本計畫整合風力發電機最大功率追蹤、功因修正、市電併聯與孤島偵測等功能於一永磁式同步風力發電機之市電併聯型 T 型電能轉換介面，並藉由 PSIM 電路模擬軟體進行分析模擬，由 25KW 與 150KW 永磁式同步風力發電機之模擬結果證實本計畫所提出之三相 T 型交流-直流電能轉換器採用虛擬電阻控制，可將三相 T 型交流-直流電能轉換器操作成三相平衡純電阻並聯至風力發電機輸出，因此風力發電機之各相輸出電流無論在暫態或穩態均能自動與其端電壓之波形、相位及頻率相同，使其接近單位功因，並具有良好的暫態響應，且能控制風力發電機追蹤至其最大功率點。模擬結果也證實三相 T 型直流-交流電能轉換器可將三相 T 型交流-直流電能轉換器輸出之直流電能轉換成高功因低諧波之高品質交流電流注入電力系統，且利用市電電流偵測法可有效偵測出孤島運轉，停止電能轉換界面之運轉。

## 肆、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.United Nations, 1997, Kyoto Protocol To The United Nations Framework, Kyoto
- 5.台電月刊編輯小組, 2016, “認識巴黎高峰會”, 台電月刊, 638 期, 頁 6-9, 2 月。
- 6.United Nations, 2015, Adoption Of The Paris Agreement, Paris
7. <http://2014energy.tw/>
- 8.台電月刊編輯小組, 2016, “前進海域借風發電”, 台電月刊, 642 期, 頁 4-17, 6 月。
- 9.K. Tan and S. Islam, “Optimum control strategies in energy conversion of PMSG wind turbine system without mechanical sensors”, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, June 2004, Vol. 19, Issue 2, pp. 392-399.
10. 沈家民, 2007, “風力發電系統新式最大功率追蹤方法之研究”, 國立高雄應用科技大學, 碩士論文。
11. 李宗翰, 2011, “以新型交流-直流電力轉換器為基礎之市電併聯型風力發電系統之研製”, 國立高雄應用科技大學, 碩士論文。
12. IEEE Std. 929-2000, IEEE Recommended Practice for Utility

- Interface of Distributed (PV) Systems, 2000.
13. M. Ropp, "Evaluation of islanding detection methods for photovoltaic utility interactive power systems", Report IEA PVPS, 2002.
  14. H. Kobayashi, K. Takigawa, E. Hashimoto, A. Kitamura, and H. Matsuda, "Problems and countermeasures on safety of utility grid with a number of small-scale PV systems", Twenty First IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Vol. 2, 1990, pp. 850-855.
  15. F. D. Mango, M. Liserre, A. D. Aquila, and A. Pigazo, "Overview of Anti-Islanding Algorithms for PV Systems. Part I: Passive Methods", Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. 1878-1883.
  16. F. D. Mango, M. Liserre, and A. D. Aquila, "Overview of Anti-Islanding Algorithms for PV System. Part II: Active Methods", Power Electronics and Motion Control Conference, 2006, pp. 1884-1889.
  17. M. E. Ropp, M. Begovic, and A. Rohatgi, "Prevention of islanding in grid-connected photovoltaic systems", Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 7, 1999, 39-59.
  18. A. Kitamura, M. Okamoto, F. Yamamoto, K. Nakaji, H. Matsuda, and K. Hotta, "Islanding phenomenon elimination study at Rokko test center", in Proc. 1st IEEE World Conf. Distributed Energy Conversion, Vol. 1, 1994, pp.759-762.
  19. M. E. Ropp, D. Larson, S. Meendering, D. McMahon, J. Ginn, J. Stevens, W. Bower, S. Gonzalez, K. Fennell, and L. Brusseau, "Discussion of a Power Line Carrier Communications-Based Anti-Islanding Scheme using a Commercial Automatic Meter Reading System", IEEE Photovoltaic Energy Conversion

- Conference, 2006, pp. 2351-2354.
20. 蔣文榮，2009，“市電併聯型太陽能發電系統電能轉換器控制之研究”，國立高雄應用科技大學，博士論文。
  21. Jia-Min Shen , Hurng-Liahng Jou , Jinn-Chang Wu, 2010, “Grid-Connected power converter with islanding detection and active power filter functions”, The 2nd International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, pp. 501-506, Hefei ,16-18 June.
  22. Z. Chen, S. A. Gomez, and M. McCormick, “A fuzzy logic controlled power electronic system for variable speed wind energy conversion systems”, IEE Eighth International Conference, No. 475, Sept. 2000, pp. 114-119.
  23. A. A. Shaltout and A. F. El-Ramahi, “Maximum power tracking for a wind driven induction generator connected to a utility network”, Applied Energy, Vol. 52, 1995, pp. 243-253.
  24. 黃俊傑，2015，“以新式多階直流-直流電能轉換器為基礎之高壓直流配電系統”，國立高雄應用科技大學，碩士論文。
  25. Ned Mohan, Tore M. Undeland , and William P. Robbins, 2002, “Power Electronics: Converters, Applications, and Design”, 3rd Edition, Wiley.