

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

模組化換流器並聯控制技術研製
Control Techniques for Modularized Inverters

計畫編號：992001INER061

受委託機關(構)：台灣大學電機工程學研究所

計畫主持人：陳耀銘 副教授

核研所聯絡人員：張永瑞、羅國原

聯絡電話：(02)3366-3667

E-mail address：ymchen@cc.ee.ntu.edu.tw

報告日期：2010-12-15

目 錄

目 錄.....	i
中文摘要.....	1
英文摘要.....	2
壹、計畫緣起與目的.....	3
貳、研究方法與過程.....	4
一、主從式架構.....	4
二、ASDM 應用在實虛功補償之公式推導.....	5
參、主要發現與結論.....	10
一、模擬部分.....	10
二、實作部分.....	12
肆、參考文獻.....	19

中文摘要

本計畫之目標是發展太陽能市電並聯發電系統(簡稱 PV 系統), 的模組化技術, 使系統具有更彈性的使用性與擴充性。並發展出非同步和差調變控制架構 (Asynchronous Sigma-Delta Modulation; ASDM) 的實虛功補償功能, 使 PV 系統具有提供實虛功和配合市電補償實虛功的功能。ASDM 是一種電流控制方法, 利用所設定的輸出電流作為參考值, 推算出一參考電壓, 以參考電壓及電流兩個參數, 經過非同步和差調變控制後, 達到輸出電流的控制。並架構出主從式的溝通與控制結構 (Master-Slave structure, 簡稱 MS 架構), 來讓不同的換流器模組間可互相輔助和協調, 以期能達到穩定輸出和控制。

本計畫最後將實現三組具有實虛功補償的 1kW 模組化太陽能市電並聯換流器, 並利用 MS 架構做模組間的溝通。以實證說明 ASDM 控制架構應用在實虛功補償上的可能性, 並提供一方便可行的太陽能市電並聯系統架構。

關鍵字: 實功、虛功、太陽能、非同步和差調變

Abstract

The objective of this research project is to develop Modularized Grid-tied Inverter and Asynchronous Sigma-Delta Modulation (ASDM) control scheme in PV system. The grid-tied inverter could offer the real power and reactive power to city power system with ASDM control. It could be applied to implement the city power situation. ASDM control scheme is a method of current control. We expect a reference current I_{ref} to set up output current, and calculate a reference voltage V_{ref} by I_{ref} . We input V_{ref} and I_{ref} to ASDM control scheme. ASDM control scheme would output bipolar PWM signal to four switches in full-bridge inverter. We could control the output current by ASDM control.

We implement a Modularized Grid-tied Inverter with ASDM control. It make up with two 1kW grid-tied inverters which could offer real power and reactive power to city power system. We show three situations they are: Case1. All real power output (1kW), output current and output voltage are in phase, Case2. A half real power (500kW) and a half reactive power output (500kVAR) , output current is lagging output voltage 45 degree, Case3. All reactive power output (1kVAR) , output current is lagging output voltage 90 degree.

key word: reactive power, real power, PV system, ASDM

壹、計畫緣起與目的

PV 系統在環保意識抬頭的現在，成為綠色科技其中一個重要的環節。由於 PV 系統的相關法規尚未定義清楚，PV 系統仍具有很大的發展空間，其中市電並聯換流器是目前最重要的技術之一。換流器(Inverter)是將太陽能的直流電源，轉換成交流電能，再匯入市電電網中。由於換流器的輸出端與市電併聯，所以輸出電壓必須與市電電壓相同，不能任意變動。因此，換流器的輸出電能，主要便是由輸出電流決定。市電並聯換流器的主要目標便是產生一與電壓波形相同的交流電流，而此同時，換流器也可具有協助市電穩定改善電力品質的功能。因此，換流器在控制電流的同時，必須控制輸出電流大小與相位，以達到實虛功調節的能力。所以，換流器的電流控制就成了分散式發電系統中最重要技術。

本計畫之目標為實現一具有實虛功補償功能的模組化 PV 系統。將利用 ASDM 電流控制法，來實現實虛功補償功能，使 PV 系統具有提供實虛功和配合市電補償實虛功的功能。利用 ASDM 電流控制法必須正確的控制內部的兩個參數，才可藉由積化和差調變來產生正確的脈寬調變信號(Pulse Width Modulation; PWM) ，達到有效的電流控制之目的。而 ASDM 的控制機制必須藉由信號處理器(Digital Signal Processor; DSP)來實現，可以減少硬體電路的複雜度。

貳、研究方法與過程

目前本計畫進度可分成兩部分說明：

一、主從式架構

主從式架構 (Master-Slave structure; MS structure) 是為了簡化多組市電並聯換流器之間的聯結與溝通，並讓使用者可經由電腦控制實虛功輸出所採用的架構。其架構如圖1所示。並採用RS485的串聯傳輸架構，串聯式傳輸架構在資料傳輸上，雖不如並聯式傳輸架構來的快速，但更加穩定，且RS485是採用雙線資料互補的方式傳輸，更適用於遠距離的資料傳輸，所以目前在市電並聯換流器模組之間，以RS485作為溝通和下达命令的橋樑。

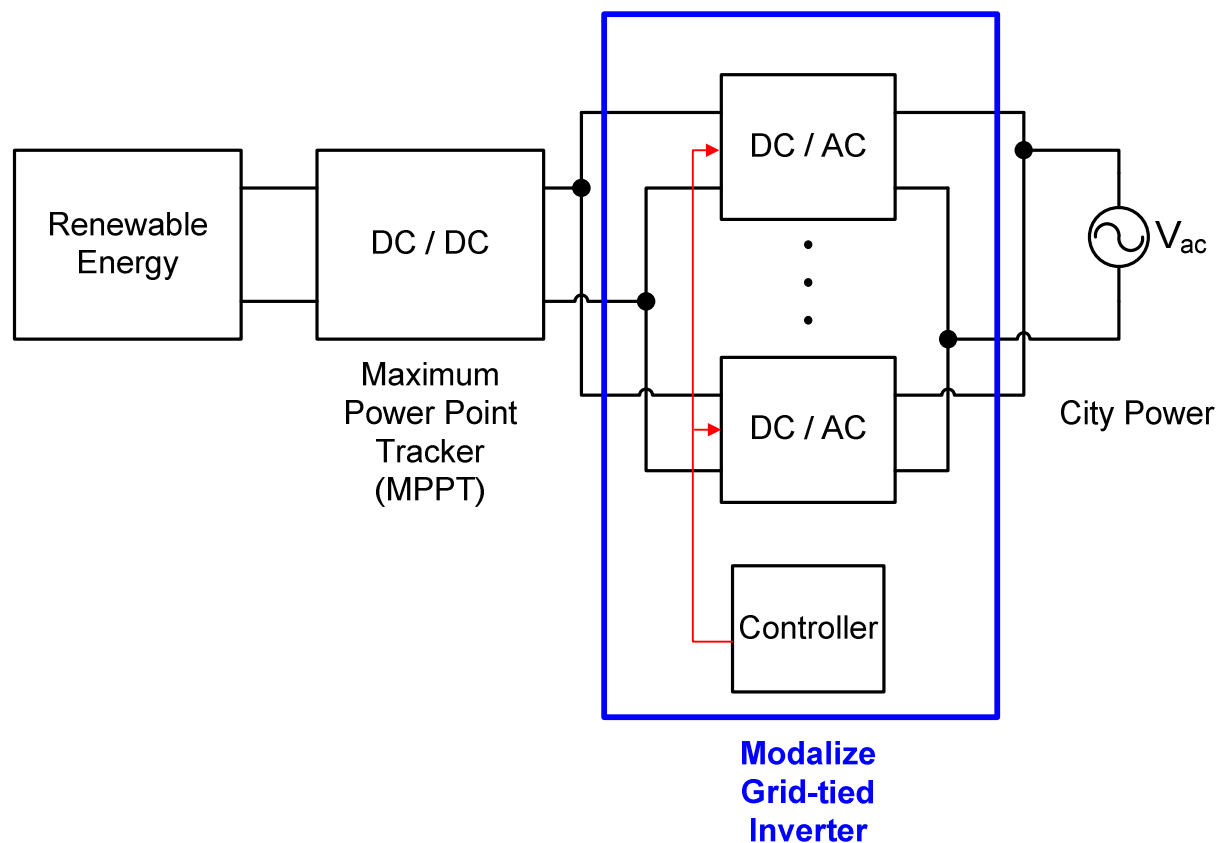


圖1 模組化市電並聯換流器之架構圖

二、ASDM 應用在實虛功補償之公式推導

ASDM (Asynchronous Sigma-Delta Modulation) 架構為一種脈波編碼調變法 (Pulse Code Modulation; PCM)，如圖 2 所示，原本應用於通訊處理，可以將類比訊號轉換成數位訊號或將數位訊號轉成類比訊號。作法是將輸出訊號與使用者所設定的參考電壓準位比較 (Delta)，所得的誤差量 (V_{err})，經由積分器，圖 3，將誤差量累積 (Sigma)，此誤差累積量 (V_{int})，再由磁滯控制器 (圖 2 中 U2) 處理。磁滯控制是經由設定一個高低電壓準位，來與誤差累積量比較，當誤差累積量到達磁滯控制器的高準位時，磁滯控制器的輸出電壓轉為高準位。此時，輸出訊號與參考電壓準位的誤差量，為一負值，經過積分器，其誤差累積量逐漸下降。當誤差累積量下降到磁滯控制器的低準位時，磁滯控制器的輸出電壓轉為低準位。此時，輸出訊號與參考電壓準位的誤差量，為一正值，經過積分器，其誤差累積量逐漸上升，其後進入下一個週期。此為 ASDM 在一個週期中的操作方式。如圖 4 所示。由於磁滯控制器的輸出為一脈波調變波形，無固定頻率，所以為一非同步 (Asynchronous) 的變頻電流控制法。

本計畫將使用 ASDM 控制架構來控制一個全橋換流器。如圖 5 所示。控制的方式則採用較為基本的雙向開關切換 (Bipolar voltage switching)，以簡化控制架構。

以下針對 ASDM 的特性進行方程式的推導及說明：

從圖 3 可得：

$$\Delta V_{int} = \frac{V_{ref} - V_{ASDM}}{R_1 C_1} \Delta t \quad \Rightarrow \quad \Delta V_{int} = \frac{V_{err}}{R_1 C_1} \Delta t \quad (1)$$

承(1)從圖 3 可得

$$2\Delta V = \frac{(V_{ref} + V_{CC})}{R_1 C_1} T_2 \Rightarrow T_2 = \frac{2\tau \Delta V}{V_{ref} + V_{CC}} \quad (2)$$

$$2\Delta V = -\frac{(V_{ref} - V_{CC})}{R_1 C_1} T_1 \Rightarrow T_1 = \frac{-2\tau \Delta V}{V_{ref} - V_{CC}} \quad (3)$$

$$\boxed{T_s = T_1 + T_2 = \frac{4\tau \Delta V V_{CC}}{V_{CC}^2 - V_{ref}^2}} \quad (4)$$

T_s 為此變頻控制器之頻率方程式。

由圖 5 的全橋換流器可以推導出平均輸出電壓為：

$$v_{ab} = \frac{1}{T_s} [V_{DC} D T_s - V_{DC} (1-D) T_s] = (2D-1)V_{DC} \quad (5)$$

$$\text{又 } v_{ab}(t) = \frac{V_{DC}}{V_{CC}} V_{ref}(t) \quad (6)$$

$$\text{則 } \boxed{D = \frac{1}{2} + \frac{V_{ref}}{2V_{CC}}} \quad (7)$$

其中 D 為責任週期方程式。

從圖 5 的電路關係，我們可以得到參考準位的關係式。值得注意的是，因為必須做到實虛功的輸出控制，所以在推導時，需要考慮到電壓、電流的大小與相角。推導如下：

由圖 5 可知

$$\vec{i}_{ac} = \frac{\frac{V_{DC}}{V_{CC}} \vec{V}_{ref} - \vec{V}_{ac}}{j\omega L} \quad (8)$$

其中 \vec{i}_{ac} 、 \vec{V}_{ref} 、 \vec{V}_{ac} 為相量，均具有大小跟相角。

$$\text{令 } \vec{i}_{ac} = A + Bi \quad (9)$$

$$\vec{V}_{ac} = C + Di \quad (10)$$

即可整理出 \vec{V}_{ref} 的實部與虛部，進一步求出其大小與相角。其結果為：

$$(11)$$

$$\left(\begin{array}{cc} 1 & 2 \end{array} \right)$$

利用設定電壓參數 $\overline{V_{ref}}$ 及電流參數 $\overline{I_{ac}}$ ，即可使用 ASDM 控制架構讓單相全橋換流器進行實虛功補償，如圖 6 所示，圖中內容在後面在做詳細說明。

我們使用 SIMPLIS 模擬使用 ASDM 進行實虛功補償的單相全橋換流器，我們將調整 $\overline{i_{ac.ref}}$ 再進一步算出 $\overline{V_{ref}}$ ，並在 SIMPLIS 中帶入控制參數。利用簡單的向量概念，求出實功、虛功的電流分量，且輸出電壓為市電波形，因此算出電流分量，即可達到控制實虛功，如圖 7 所示。其中， V_{AC} 為市電電壓。 I_{ref} 為全橋換流器輸出電流的參考電流準位，理想上與輸出電流相同。 I_p 為能產生實功的電流成分。 I_Q 為能產生虛功的電流成分。利用 I_p 、 I_Q 可以求出 I_{ref} 的大小與相位。利用 I_{ref} 即可產生我們所要的實功與虛功。

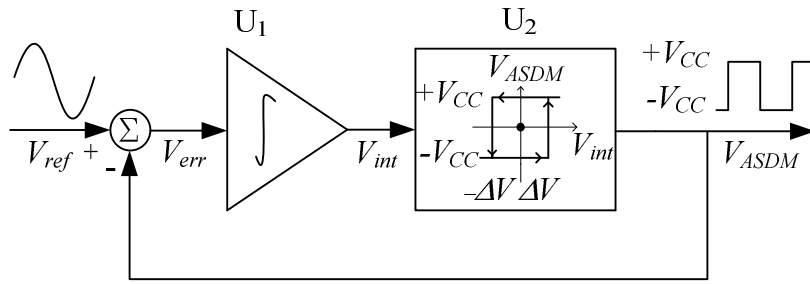


圖 2 ASDM 控制架構圖

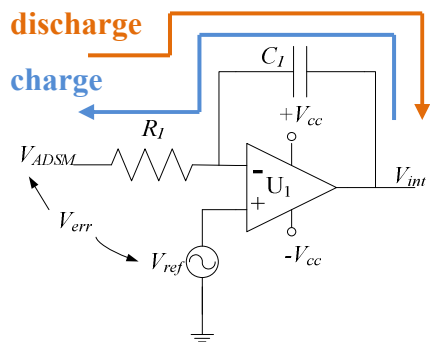


圖 3 積分器結構

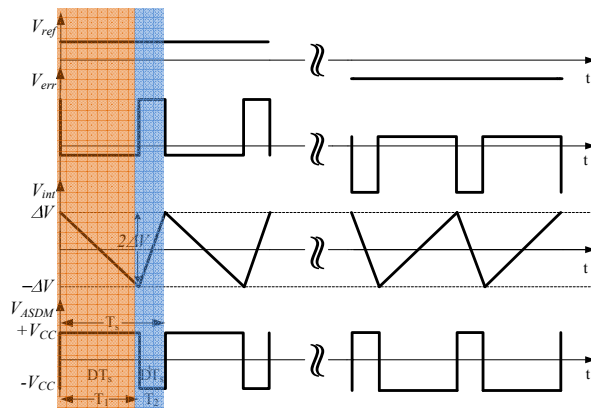
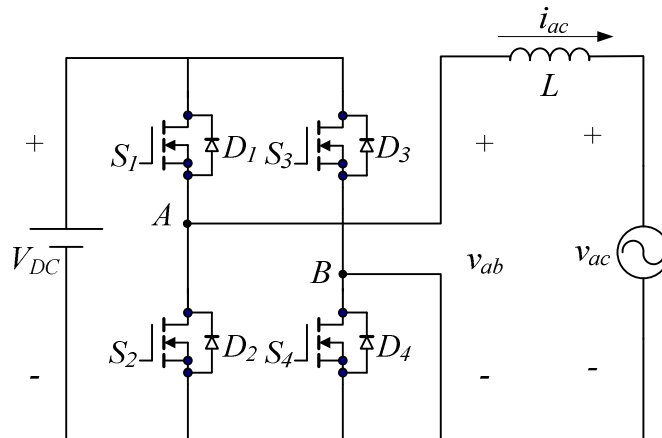


圖 4 ASDM 波形圖



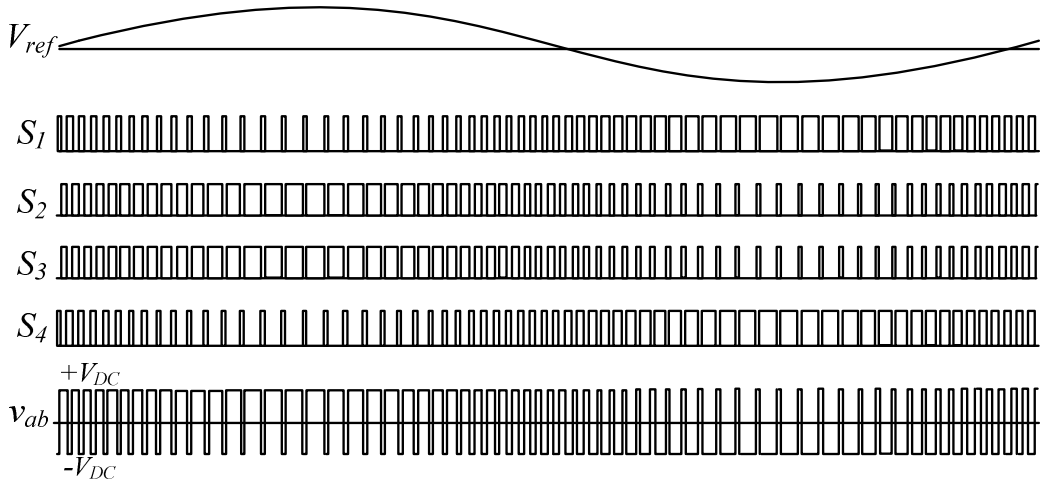


圖 5 雙極性訊號全橋換流器

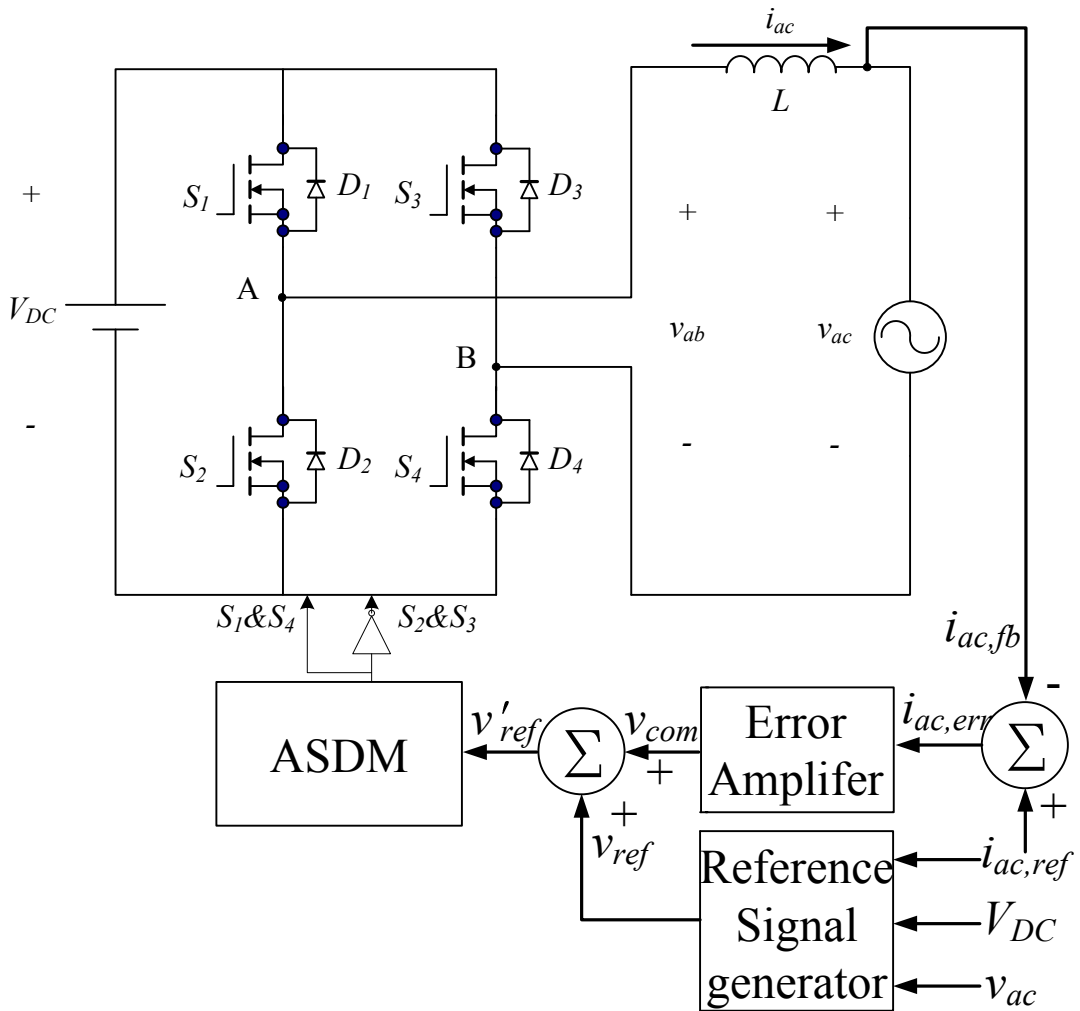


圖 6 ASDM 應用在市電並聯換流器之方塊圖

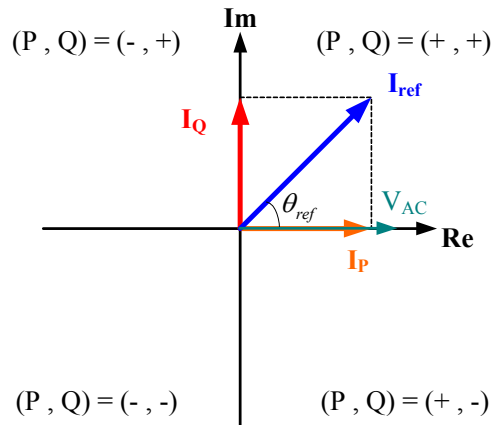


圖 7 電流實功與虛功成分示意圖

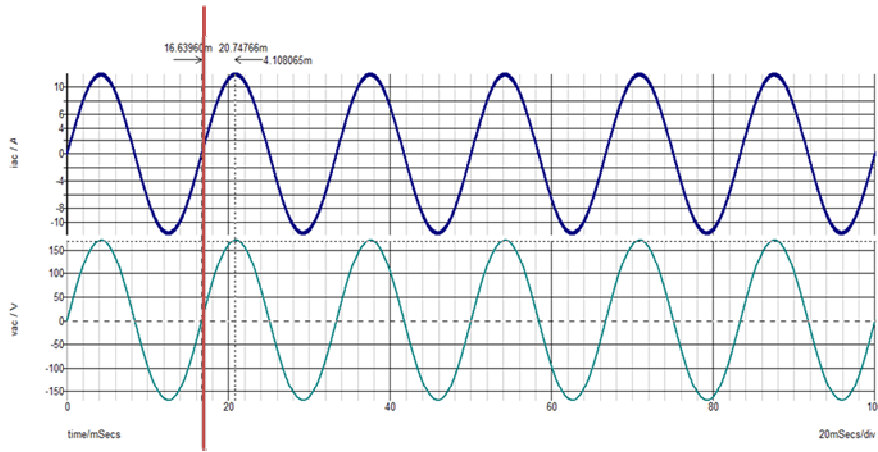
參、主要發現與結論

主要分成一、模擬部分，以及二、實作部分。

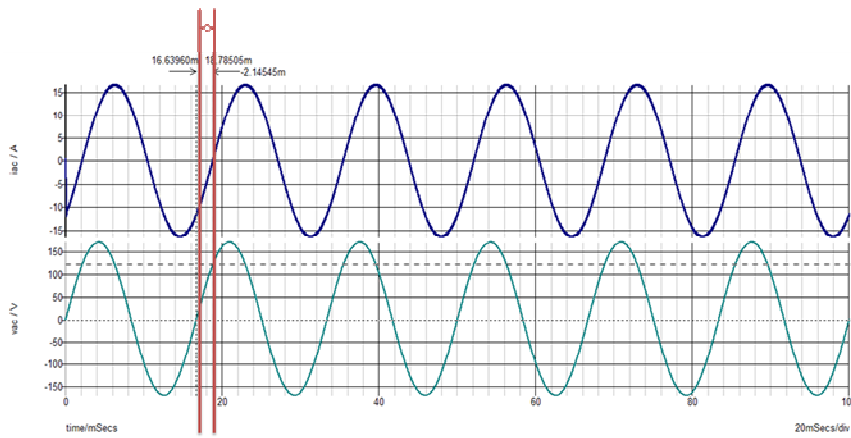
一、模擬部分

使用 SIMPLIS 電路模擬軟體模擬，模擬使用 ASDM 控制架構的市電並聯雙向換流器，並應用在實虛功補償功能上，SIMPLIS 的模擬結果如圖 8 所示。圖 8 中的(a)為電壓、電流同相的 1kW 實功輸出，(b)為電流落後電壓 45 度的 1kW 實功輸出 1kVA 虛功輸出，(c)為電流落後電壓 90 度的 1kVA 虛功輸出。

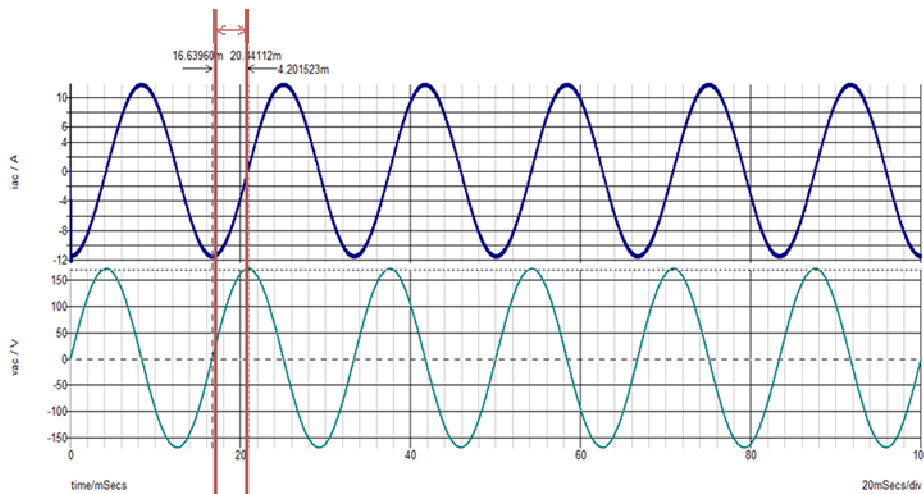
圖 8 為模擬所得到的結果，證實我們所推論的方程式與 ASDM 的實虛功應用方法，在模擬階段是可行的，接下來將針對實作部分進行說明。



(a) $S = 1\text{kVA}$ $P = 1\text{kW}$ $Q = 0$ $i_{ac} = 11.78$ i_{ac} in phase



(b) $S = \sqrt{2}\text{kVA}$ $P = 1\text{kW}$ $Q = 1\text{kVAR}$ $i_{ac} = 11.78\sqrt{2}$
 i_{ac} lagging 45 deg.



(c) $S = 1\text{kVA}$ $P = 0$ $Q = 1\text{kVAR}$ $i_{ac} = 11.78$
 i_{ac} leading 90 deg.

圖 8 不同實功與虛功成分輸出之模擬結果

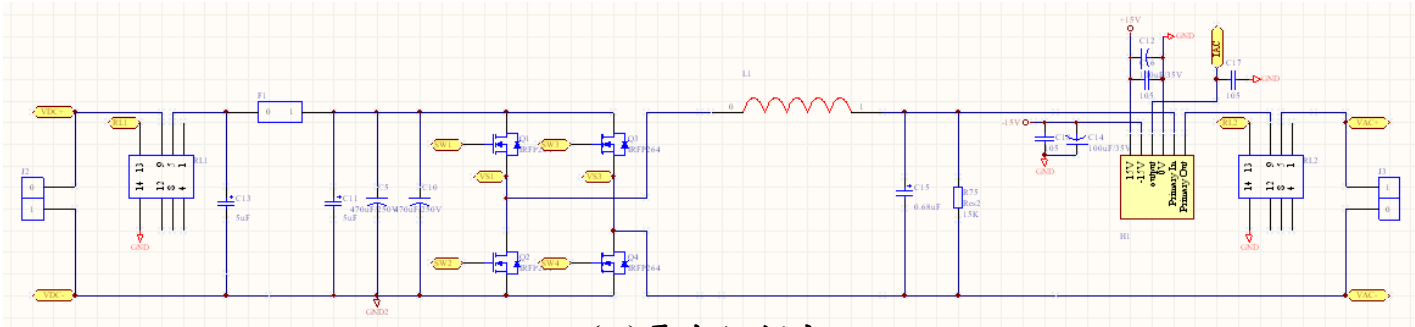
(a.)1kW 實功輸出，電壓、電流同相位。

(b.)1kW 實功與 1kVA 虛功的輸出，電壓、電流相位差 45 度。

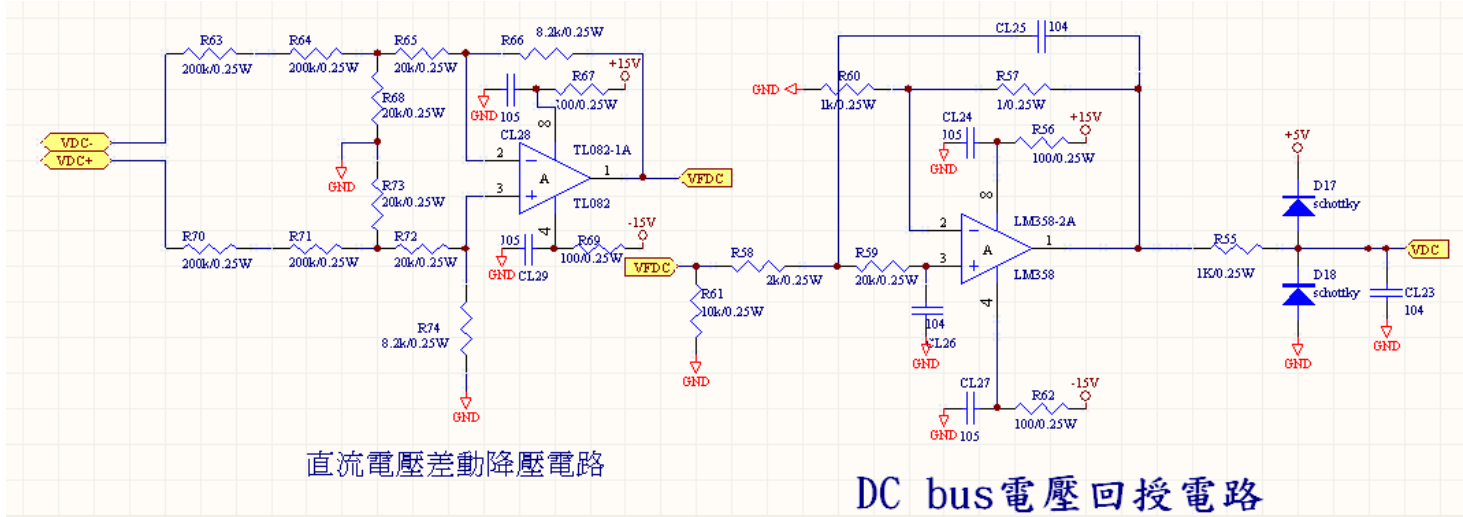
(c.)1kVA 虛功的輸出，電壓、電流相位差 90 度。

二、實作部分

ASDM 控制架構的市電並聯雙向換流器，因為邏輯複雜，為了簡化硬體電路，我們將採取 dsPIC30F2020 微處理器做為控制器，並以較為常見的全橋式換流器作為基本架構。為了實現 ASDM 控制架構的市電並聯換流器，系統中需監控 DC bus 的電壓電流，針對市電電壓作取樣，取其零交越點，因此需要降壓電路、電壓偵測電路、電流偵測電路、零交越點偵測電路，還有微處理器驅動電路，MOSFET 驅動電路...等，在此不多詳述。使用 ASDM 控制電路來控制市電並聯雙向換流器，如圖 6 所示。其中， V_{ac} 為我們所偵測的市電電壓訊號， V_{DC} 為 DC bus 上的電壓訊號， $I_{ac,ref}$ 為電流的準位訊號利用圖 7 所示的方法可以得到，經由這三個訊號，可以經由計算出 ASDM 控制法則所需要的 V_{ref} 。 $I_{ac,ref}$ 經由市電電流訊號負回授，經過補償器後，再次調整 V_{ref} 成為 V_{ref}' 進入前面所述的 ASDM 控制電路，產生如圖 5 所示的四個切換訊號，為雙極性控制訊號。以上為實作所使用的操作法則。圖 9 為市電並聯雙向換流器實際電路圖，在此僅作參考，不再詳加說明。



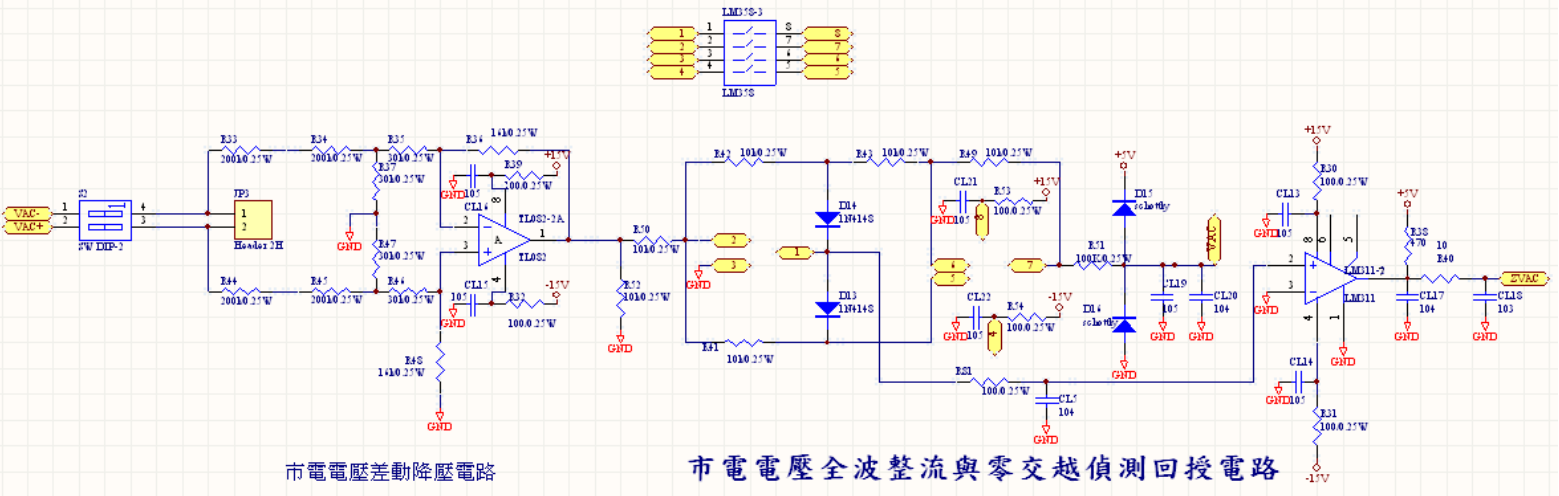
(a.) 電力級部分



直流電壓差動降壓電路

DC bus 電壓回授電路

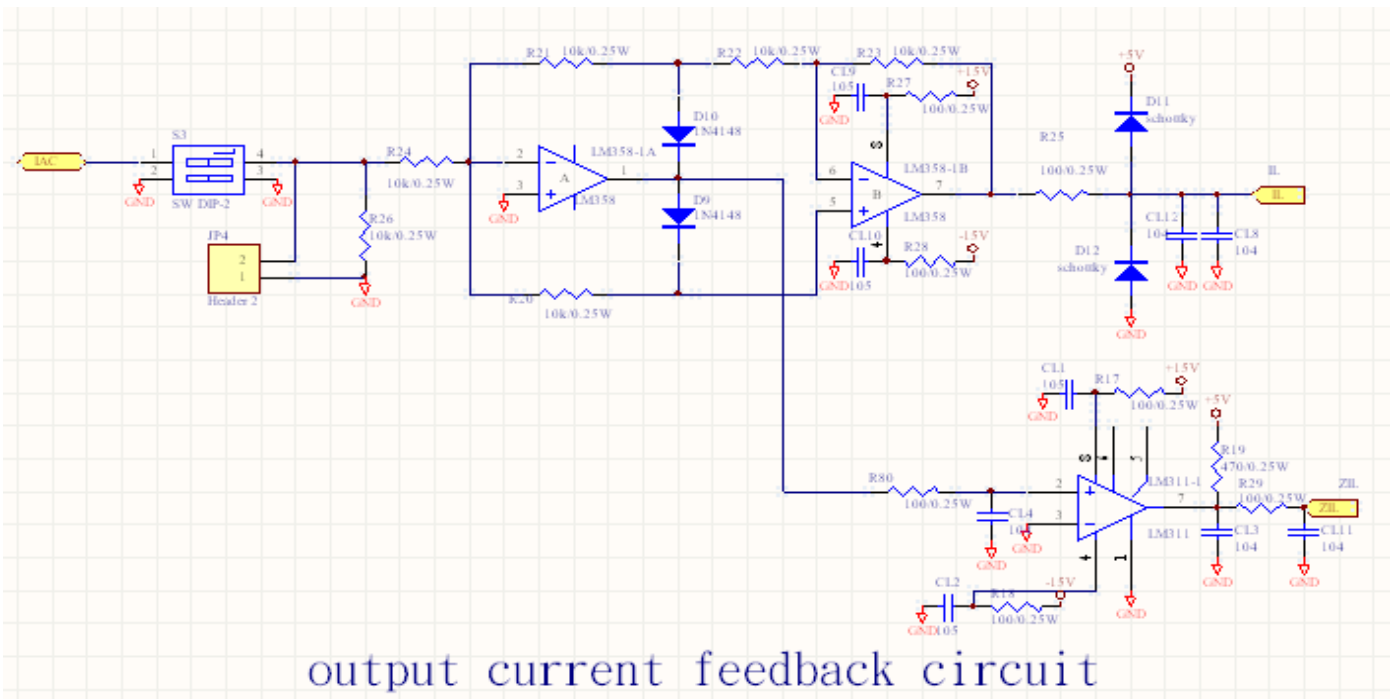
(b.) DC bus 電壓回授電路



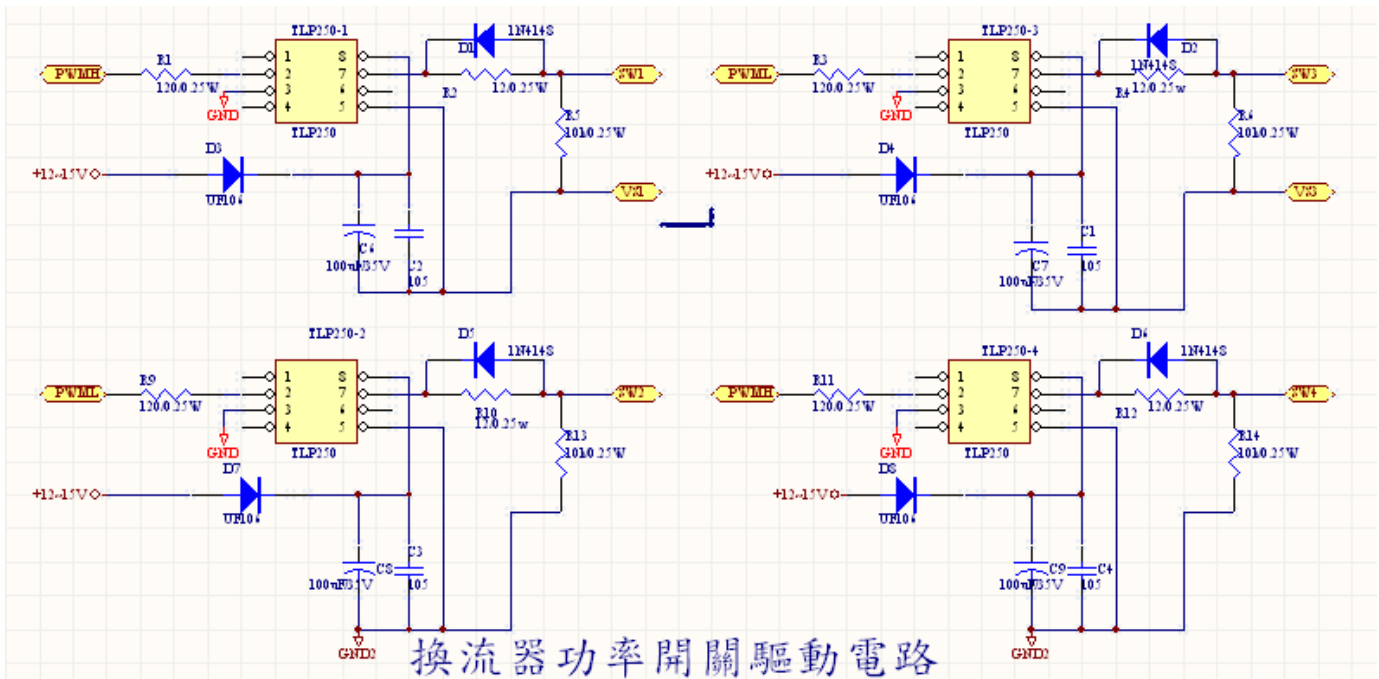
市電電壓差動降壓電路

市電電壓全波整流與零交越偵測回授電路

(c.) 零交越點偵測電路



(d.) 電流回授電路



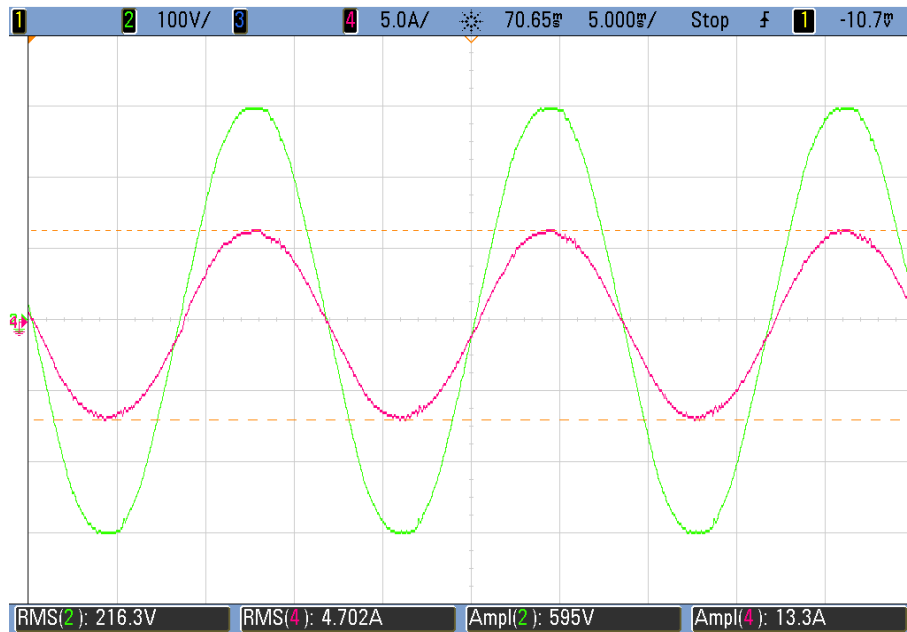
(e.) 全橋換流器開關驅動電路

圖 9 市電並聯雙向換流器實際電路圖

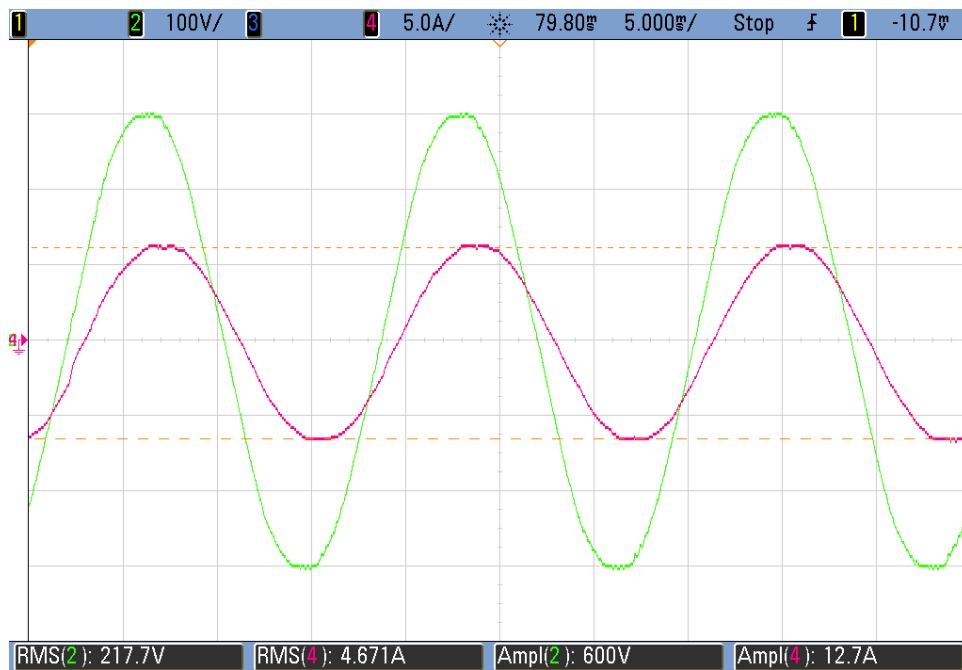
我們總共研製了兩台市電並聯換流器，兩台並聯成為一模組化市電並聯換流器，再使用控制器下命令，達到電流命令的調變，一台換流器之輸出瓦數為 1kW，總輸出瓦數為 2kW，以下用一台換流器來展示實虛功輸出的波形。

實測波形部分如圖 10 所示。為了能夠降低換流器的額定電流，我們提高實驗場所的市電電壓為 $220V_{\text{rms}}$ ，所以換流器所並聯的市電電壓為 $220V_{\text{rms}}$ 。圖 10(a)為純實功輸出的市電並聯換流器輸出電壓電流波形，此時電流與電壓同相，電流命令大小約為 6A，所輸出的實功約為 1kW。圖 10(b)為有實虛功輸出的市電並聯換流器電壓電流實測波形，電流落後電壓 45 度，電流命令大小約為 3A，此時輸出的實功大約為 700W，虛功大約為 700VAR，輸出的總功為 1kVR。圖 10(c)為純實功輸入的市電並聯換流器電壓電流實測波形，電流落後電壓 90 度。電流命令大小為 6A，提供市電虛功能量約 1kVAR。圖 11 為所研製的模組化市電並聯換流器。

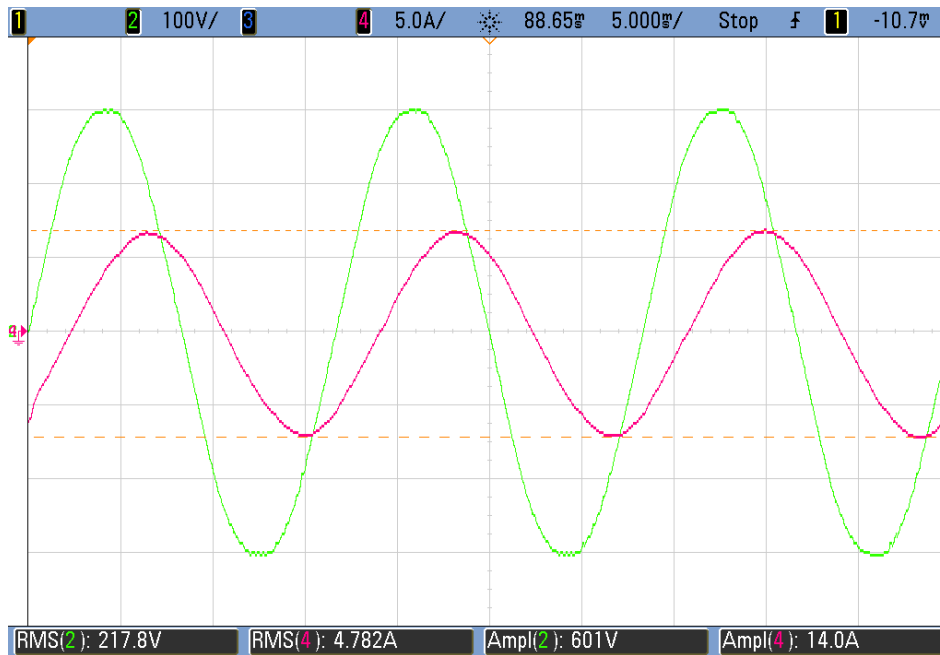
未來將會針對市電並聯換流器的控制部分進行改良，導入較高階的補償控制，減少穩態誤差，並嘗試將換流器的控制模式從雙極性切換架構變成單極性切換。另外，如何利用實虛功控制模式來改善市電狀態，也是未來電路改善的重點。



(a)純實功輸出的市電並聯換流器輸出電壓電流波形，電流電壓同相



(b)有實虛功輸出的市電並聯換流器電壓電流實測波形，
電流落後電壓 45 度。



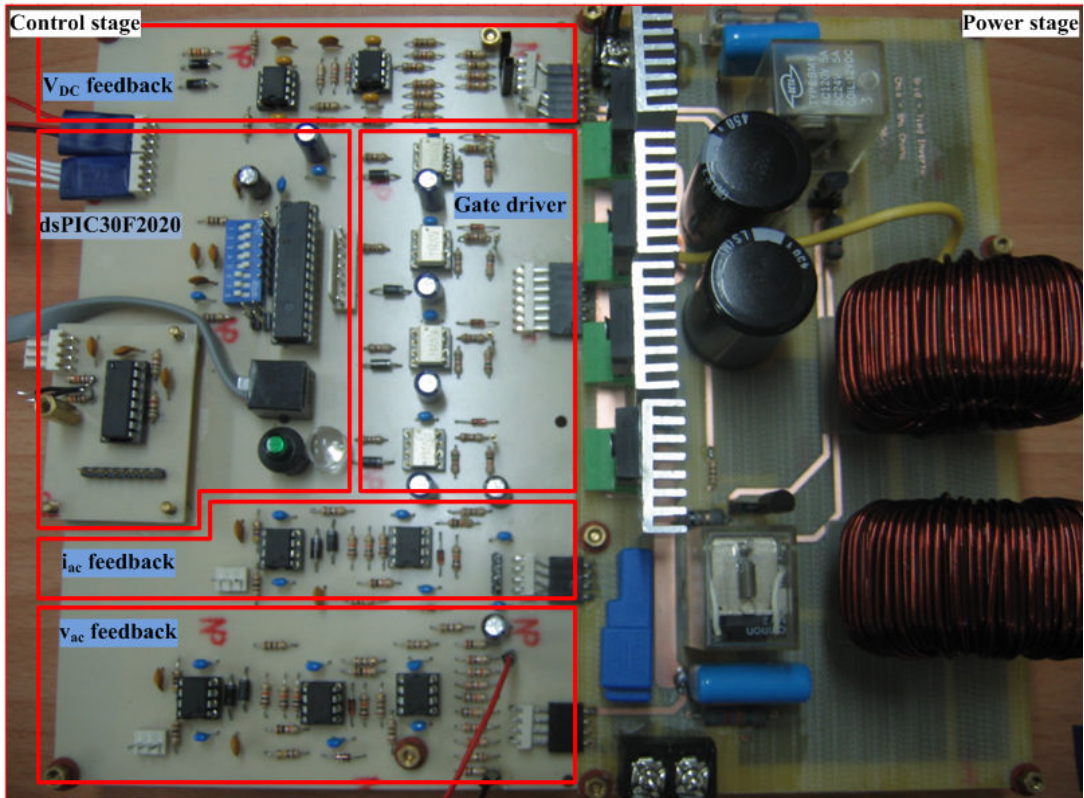
(c)純虛功輸出的市電並聯換流器電壓電流實測波形，
電流落後電壓 90 度。

圖 10 實測波形

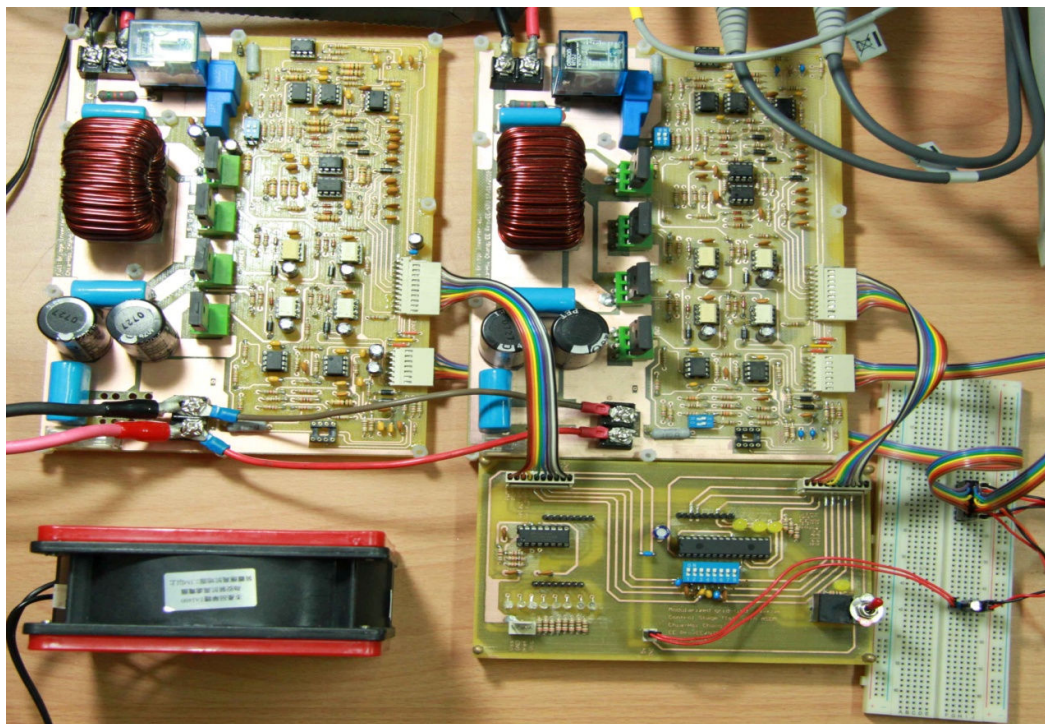
(a)純實功輸出的市電並聯換流器輸出電壓電流波形，
電流電壓同相。

(b)有實虛功輸出的市電並聯換流器電壓電流實測波形，
電流落後電壓 45 度。

(c)純虛功輸出的市電並聯換流器電壓電流實測波形，
電流落後 90 度



(a) 單組市電並聯換流器



(b) 模組化市電並聯換流器及微處理器

圖 11 實際電路

肆、參考文獻

1. Mohan, Undelano and Robbius, "Power Electronics," *John Wiley & Sons Inc.*, 1995.
2. Shu-Zu Dai, Nelson Lujara, Boon-Teck Ooi, "A Unity Power Factor Current-Regulated SPWM Rectifier with a Notch Feedback for Stabilization and Active Filtering," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 7, NO. 2, pp. 365-363, 1992.
3. Bakari Mwinyiwiwa, Zbigniew Wolanski, Boon-Teck Ooi, "Current Equalization in SPWM Facts Controllers at Lowest Switching Rates," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 14, NO. 5, pp. 900-905, 1999.
4. Rui Xiong, Wei Hao, Jian Chen, "A Study of Parallel Operation Control Technique of DC/AC SPWM Inverter," *IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, PEDS'99, pp. 1027-1032, 1999.
5. Amirnaser Yazdani, Reza Iravani, "A Unified Dynamic Model and Control for the Voltage-Sourced Converter Under Unbalanced Grid Conditions," *IEEE Transactions on Power delivery*, Vol. 21, NO. 3, pp. 1260-1269, 2006.
6. River T. H. Li, Henry Shu-hung Chung, Tony K. M. Chan, "An Active Modulation Technique for Single-Phase Grid-Connected CSI," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 22, NO. 4, pp. 1373-1382, 2007.
7. A. Kotsopoulos, J.L. Duarte, M.A.M. Hendrix "A predictive control scheme for DC voltage and AC current in grid-connected photovoltaic inverters with minimum DC link capacitance," *Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 1994-1999, 2001.
8. Guang-Da Chen, Yi-Zhou Shen, Mian-Hua Huang "A Predictive Current Regulator Using Linear Neural Networks For Three-phase

- Voltage Source PWM-Inverter,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 793-798, 2005.
9. Bin Yu, Liuchen Chang “Improved Predictive Current Controlled PWM for Single-Phase Grid-Connected Voltage Source Inverters,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 231-236, 2005.
 10. Qingrong Zeng, Liuchen Chang, “Novel SVPWM-Based Predictive Current Controller for Three-Phase Grid-Connected Inverters,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 1262-1265, 2005.
 11. José Rodríguez, Jorge Pontt, César A. Silva, Pablo Correa, Pablo Lezana, Patricio Cortés, “Predictive Current Control of a Voltage Source Inverter,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 54, NO. 1, pp. 495-503, 2007.
 12. Haithem Abu-Rub, Jaroslaw Guzin’ski, Zbigniew Krzeminski, Hamid A. Toliyat, “Predictive Current Control of Voltage-Source Inverters,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 51, NO. 3, pp. 585-593, 2004.
 13. D.G. Holmes, D.A. Martin “Implementation of a Direct Digital Predictive Current Controller for Single and Three Phase Voltage Source Inverters,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 960-913, 1996.
 14. Jingquan Chen, Aleksandar Prodic’, Robert W. Erickson, Dragan Maksimovic’, “Predictive Digital Current programmed Control,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 18, NO. 1, pp. 411-419, 2003.