

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

數位式功率因數修正與脈寬調變控制 IC 之研製(III)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC94-2213-E-009-146-

執行期間：94年08月01日至95年07月31日

執行單位：國立交通大學電機與控制工程學系(所)

計畫主持人：鄒應嶼

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 9 月 18 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告
 期中進度報告

數位式功率因數修正與脈寬調變控制 IC 之研製(3/3)

Design and Implementation of a Digital Programmable PFC-PWM
Control IC (3/3)

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 94-2213-E-009-146

執行期間：94 年 8 月 1 日至 95 年 7 月 31 日

計畫主持人：鄒應嶼 教授

共同主持人：

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：交通大學電機與控制工程系

中 華 民 國 九 十 五 年 九 月 一 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

數位式功率因數修正與脈寬調變控制 IC 之研製(3/3)

Design and Implementation of a Digital Programmable PFC-PWM Control IC (3/3)

計畫編號：NSC 94-2213-E-009-146

執行期限：94 年 8 月 1 日至 95 年 7 月 31 日

主持人：鄒應嶼 博士 國立交通大學電機與控制工程系 教授

一、中文摘要

本計畫探討應用於單相交換式電源供應器數位式功率因數控制與脈寬調變控制 IC 之設計與實現，分析及設計單相升壓型 (Boost-type) 功率因數修正器 (Power-Factor-Corrector, PFC) 數位控制架構，應用於單相升壓型交直流轉換器，發展數位式 PFC 控制架構，利用 PFC/PWM 開關信號的同步控制，可降低輸出漣波電壓。本研究將利用數位控制的優點，提出一種精簡的可程式與可組合式的控制架構，應用於具有功率因數修正功能的開關式電源供應器。本研究探討數位式 PFC 控制 IC 的實現方法，以電腦模擬分析量化誤差與捨去誤差之效應，並完成以 FPGA 為基礎的實現驗證。

關鍵詞：數位電源控制 IC、功率因數修正、脈寬調變控制、交換式電源供應器

Abstract

This project makes a research on the design and implementation of a digital PFC-PWM combination control IC for off-line single-phase switching-mode power supplies. The combination of the power factor control and PWM control can greatly simplify the control circuitry. A digital programmable PFC control scheme has been developed in applications to single-phase switching power supplies with a half-bridge PFC input converter. Experimental verification has been carried out using a designed FPGA-based programmable digital controller.

Keywords: digital power control IC, PFC control.

二、緣由與目的

近年來在各類電力電子產品的廣泛使用下，電源諧波污染問題也越來越嚴重，為了提高供電品質及能源使用效率，世界各國對於電力電子產品所產生之諧波及低功率因數，都會訂定標準規範來加以管制[1]-[2]。在電力電子設備上，必須能夠使輸入電流波形處理更趨於正弦波形，降低輸入電流諧波，並使市電電壓電流同相位，達到最佳功率因數。

目前在市面上針對上述的應用發展的功率因數修正 IC，如 ML4812 及 UC3854 系列等等，在市面上已相當普遍，這些功率因數修正 IC 雖具有電路簡單優點，適用於低功率系統，但只能使用於單開關切換架構，並且無法改善系統特性，而在中高功率之功率因數修正器方面，目前尚無專用的控制 IC，其控制信號產生則配合微處理器完成，對於早期處理速度慢等單晶片而言，是項艱鉅的挑戰。近年來有許多高性能數位信號處理器的誕生，使得數位控制技術得以應用於動態響應複雜多變的交直流電源供應器中，複雜的控制理論得以藉由軟體控制的方式完成。

由於新一代高性能微處理器對電源的需求，電源控制 IC 也從傳統的單一類比控制方式[3]-[10]，朝向多功能的整合型控制 IC 發展，例如 Unitrode 與 Infineon 均推出了同時具有功率因數修正與脈寬調變控制的多功能控制 IC。展望未來，應用數位/類比 IC 設計技術於電源控制 IC 之發展，將成為電源控制 IC 的發展趨勢，電源控制 IC 將朝向數位化、可程式化、與智慧化的方向發展。

有鑑於國內電源產業的成熟與廣大市場

需求，配合國內 IC 設計產業發展，本計畫發展數位式 PFC 控制 IC 的設計技術。本研究分析及設計單相升壓型功率因數修正器的數位控制架構，包含電流及電壓迴路。並討論於數位控制 IC 實現時需考量的一些細節。在電路架構是以升壓型式之轉換器為主要的系統設計依據，包含升壓式(boost)、半橋式(half-bridge)及無橋式(bridgeless)三種轉換器，使用 PSIM 及 Matlab 等模擬軟體輔助設計數位控制器，並藉由模擬結果以評估所設計之功率因數修正數位控制器的正確性，並以 FPGA 實現數位功率因數修正控制。

三、研究方法與成果

圖 1 所示是功率因數修正器的基本架構，主要以升壓型電路架構為主，衍生出各式交-直流轉換器架構，主要包含升壓式、半橋式、全橋式及無橋式等電路架構，如圖 2 所示。單開關升壓式轉換器具電路架構簡單，效率一般高於 90%，但功率流向只能單相傳送。

半橋式與全橋式為一般中高功率不斷電系統常用之架構，主要是由於這兩種架構具有功率可雙向傳送，而且在一般正常操作時輸入電流不會進入 DCM，無橋式轉換器與升壓式轉換器比較，可省去橋式整流電路，減少功率損耗，提高效率，且設計比較簡單，需要的元件數量較少。

半橋轉換器為升壓式轉換器演變而來，電路操作原理可參考圖 3，常用在中高功率，其最主要特點為輸入與輸出具有共地，在半橋式結構中開關電流為雙向，因此在一般操作上沒有 DCM 情形，並且此架構具雙向功率傳導能力，缺點為在輸出電壓需注意因電容特性不相同而導致電壓不平衡。

無橋式轉換器為升壓式轉換器的另一種演伸，在電路架構上輸入端為串聯，輸出端為並聯。由於不需橋式整流因此與其他兩種升壓型轉換器比較，具有元件少及效率高之特色。電路操作原理可參考圖 4，在正半週時， S_1 為主動開關控制及調整輸出電壓大小此時開關 S_2 僅作為提供電感電流充放電路徑，在負半週時則相反， S_1 與 S_2 工作的責任週期相同。

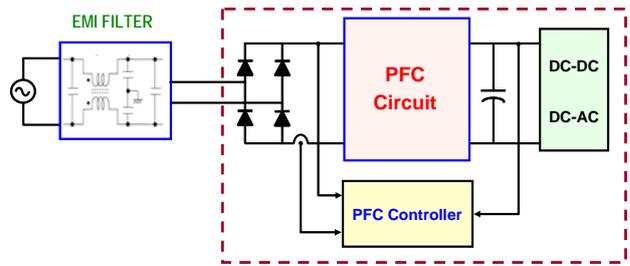


圖 1 功率因數修正器基本架構

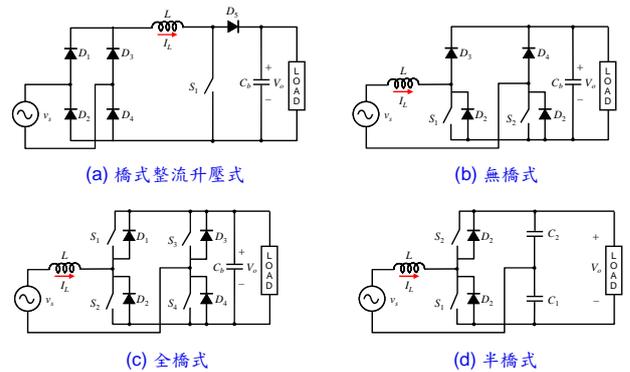


圖 2 升壓型 PFC 四種不同電路架構 (a) 橋式整流升壓式 (b) 無橋式 (c) 全橋式 (d) 半橋式

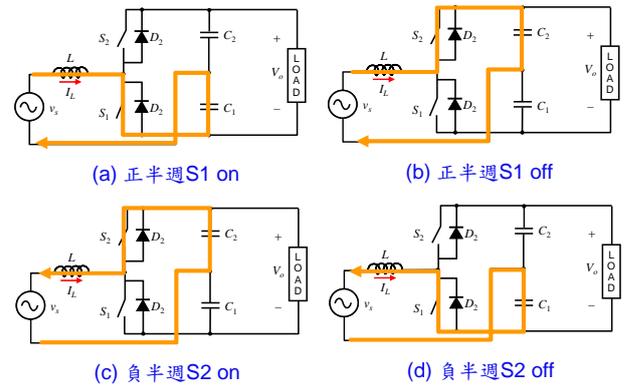


圖 3 半橋式轉換器操作原理 (a) 正半週 S_1 導通 (b) 正半週 S_1 截止 (c) 負半週 S_2 導通 (d) 負半週 S_2 截止

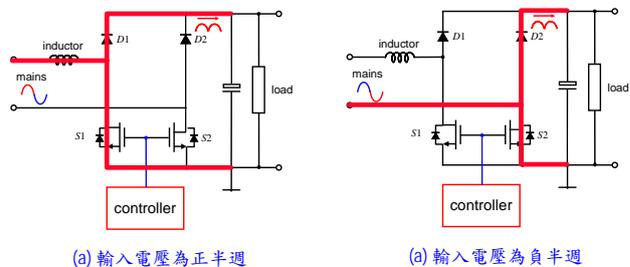


圖 4 無橋式轉換器操作原理

傳統的功率控制 IC 是採用類比電路方式實現，例如 Unitrode 公司所製造的 UC3854。隨著微電子技術的進展，數位式 PFC 控制 IC

將成為未來的發展趨勢，本研究提出單相交直流轉換器的數位式功因控制架構，可適用於單開關升壓型 PFC 轉換器與雙開關半橋式 PFC 轉接器，所提出之數位式 PFC 控制架構包含電流控制內迴路與電壓控制外迴路，除了類比/數位轉換器之外，所有的訊號處理與控制法則均以數位方式實現。

數位電源控制晶片架構

本研究提出的數位式電源控制 IC，其電路功能主要包含三個部份：類比/數位轉換器、控制器，與脈寬調變產生器。在一個數位式電源控制 IC 中，ADC 的設計扮演著關鍵的角色，設計考量因素包括：位元長度、轉換時間、電源極數、多功機制、訊號隔離方式，同步取樣機制等等，其電路設計與實現相當複雜，也界於類比/數位轉換之間，必須妥善考慮雜訊干擾的防制方法。

電流迴路在電源轉換器控制的設計中扮演著關鍵的角色，在一般較為簡單的非隔離式 dc-dc 轉換器，其電流控制迴路可藉由開關電流的峰值以類比式的比較器來控制開關單位比，但這種方式並不適合半橋式轉接電路，另外，當漣波電流比增加時，峰值電流與平均電流的誤差也會降低電流迴路的頻寬，也難以兼顧輕載與重載的動態響應。

數位式電流控制迴路實現的一個重要關鍵即在於電流取樣方式，由於開關的脈寬調變方式因而使得電流漣波亦隨之改變。此外，功率晶體的開與關亦會感應出雜訊電流，間接的耦合到回換電路。此外，取樣與計算均會造成訊號的延遲，這些因素使得數位式電流迴路對於取樣信號的誤差異常敏感，這是在高頻寬數位電流迴路設計時最主要的考慮因素。

控制法則的實現主要藉由以查表方式構成的乘法器，這種方法的優點是可以同時實現含有增益規劃的非線性數位補償器，缺點則是當位元數增加時，則需要較大的實現記憶體，此法也無法以多工器的方式共同使用，但在以低位元實現時具有簡單易於實現的優點。

典型交直流轉換器功率因數控制架構如圖 5 所示，圖 6 為所提出的數位式功率因數控制架構，圖 7 為本研究所提出的泛用型交

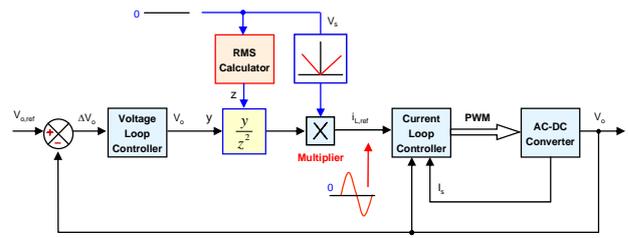


圖 5 典型交直流轉換器功率因數控制的功能方塊圖

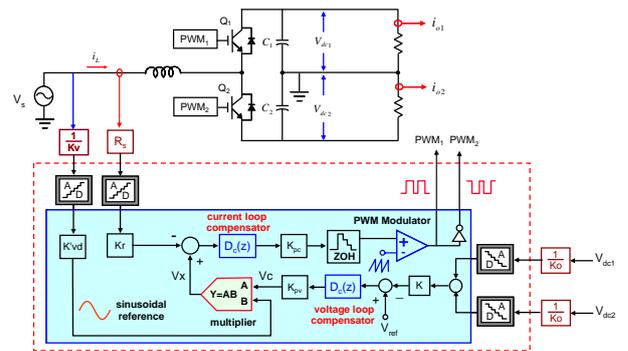


圖 6 數位式功率因數控制方塊圖

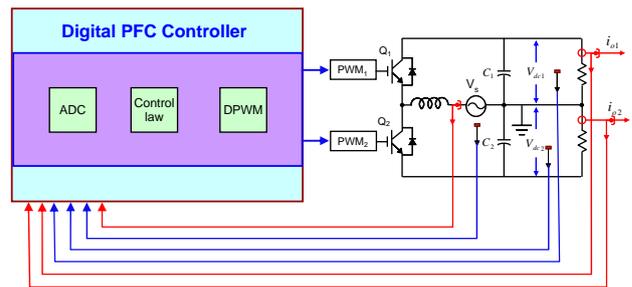


圖 7 交直流轉換器功率因數控制 IC 的系統方塊圖

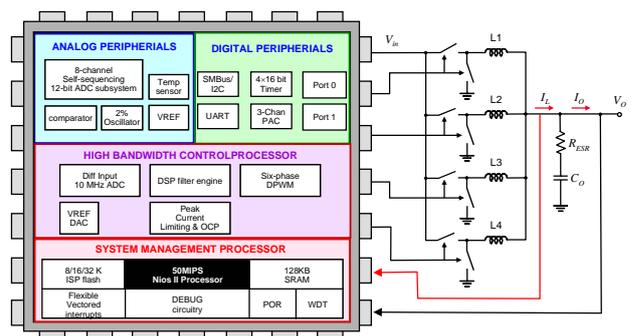


圖 8 數位電源控制晶片設計模組化架構圖

直流轉換器功率因數控制 IC 的系統方塊圖，圖 8 為所提出的模組化數位式電源 IC 設計架構。在這個模組化的設計架構。系統主要由四個子單元所構成：系統管理處理單元、數位控制單元、類比週邊單元，以及數位週邊單元。

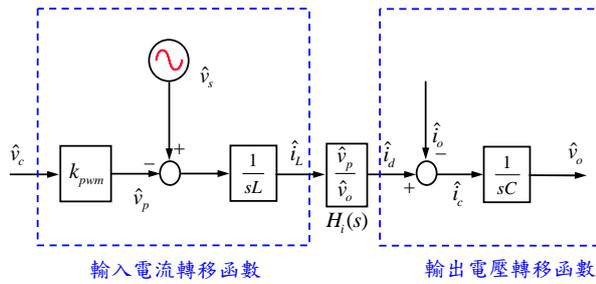


圖9 升壓型功率因數修正器小信號動態模型

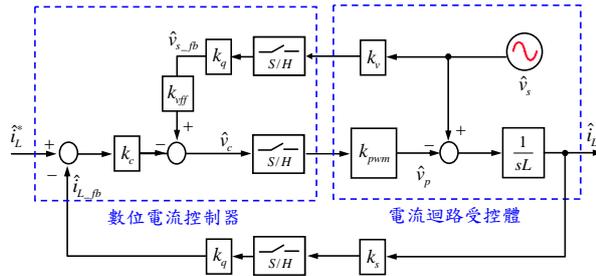


圖10 預測型電流控制迴路模型

數位式控制器之分析與設計

圖 9 為升壓型功率因數修正器小信號動態模型方塊圖，三種升壓型功率因數修正器，如升壓式、半橋式、無橋式，均由升壓式架構推演出，因此在小信號動態模型所得到的結果幾乎相同。在一般交-直流轉換器電感電流工作於連續導通模式(CCM)，通常須包含雙迴路控制，即電感電流內迴路與輸出電壓外迴路，電流迴路目的為期望控制電感電流具快速響應，而電壓迴路為使輸出電壓儘量達到高頻寬、穩壓並且降低電感電流失真。

圖 10 預測型電流迴路的控制方塊圖，為抵銷輸入電壓變動對電流路的影响，在電流迴路中加入了一項輸入電壓 v_s 的前饋補償量，達到解耦的目的，以便簡化外迴路控制器之設計。

控制器包含一個比例積分控制器與一個低通濾波器，比例積分控制器可消除穩態誤差，提高系統頻寬，加入低通濾波器可降低電壓包含的二倍頻對於電感電流的影响。圖 11 為電壓開迴路增益頻率響應圖。對於電壓迴路而言，由於受控體已經有電流迴路之控制，可以一階系統近似，加入比例積分控制器後由控制器產生的零點，通常會低於增益交越頻率，因此在高頻部份會為-20dB 的斜

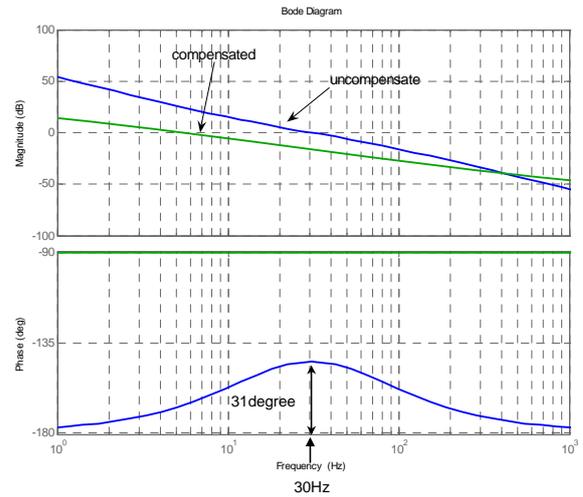


圖11 輸出電壓開迴路增益頻率響應

率，此時若加入低通濾波器使高頻部份的斜率變成-40dB，並設定濾波器極點低於二倍頻，則可有效衰減輸出電壓二倍頻成份。

模擬分析

本計畫使用 PSIM 及 Simulink 模擬軟體進行三種升壓型功率因數修正器結合閉迴路數位控制模擬，三種轉換器在電路上及控制器均使用相同參數。參數分別為：數入電壓 $V_{s(rms)} = 110V$ ，輸出電壓 $V_{dc} = 400V$ ，輸出平均功率 $P_o = 1kW$ ，切換頻率 $f_s = 24kHz$ ，數位 PWM 產生之計數單元時脈頻率 $clk = 40MHz$ ，輸入電感 $L = 1mH$ ，輸出電容 $C = 1000\mu F$ ，此電容值在半橋式視為由輸出看入的總等效電容。

圖 12 為升壓式功率因數修正器閉迴路模擬結果，根據所訂定的輸出電壓大小，可計算出在數位控制器當中電壓命令設定值為 $V_{dc} \times k_q \times k_v = 2371$ ，由圖 12 可看出無論在輕載或滿載時，輸出電壓完全追隨到所設定的電壓大小。在暫態方面，輸出負載在 0.1 秒由 20% 負載切換至滿載，其暫態時間約為 56ms，電壓掉落量約 12V。

圖 13 和圖 14 分別為半橋式以及無橋式功率因數修正器閉迴路模擬結果，負載同樣在 0.1 秒由 20% 負載切換至滿載，在圖 13 與圖 14 中均顯示在暫態及穩態時，其輸出響應與升壓式功率因數修正器一致，經由模擬結果評估所設計之功率因數修正器的數位控制架構的正確性，並且可同時使用於三種升壓型之功率因數修正器作閉迴路控制。

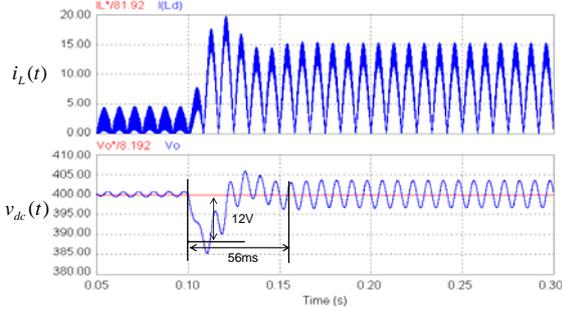


圖 12 升壓式功率因數修正器閉迴路模擬結果

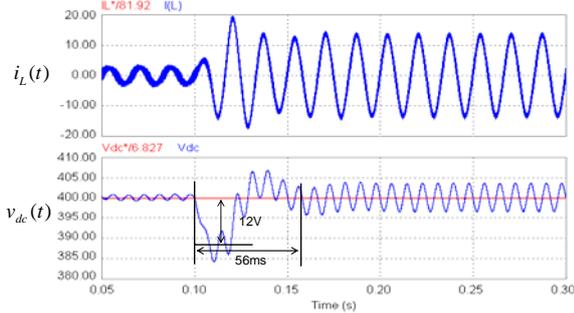


圖 13 半橋式功率因數修正器閉迴路模擬結果

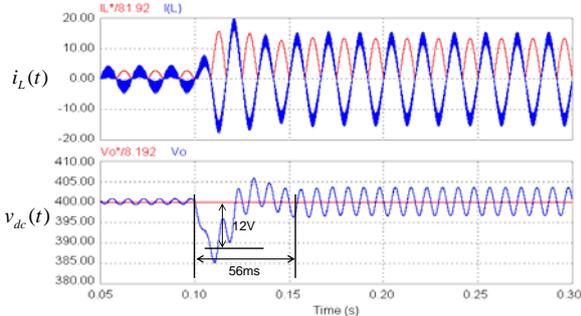


圖 14 無橋式功率因數修正器閉迴路模擬結果

數位控制器硬體電路實現的考量

切換式電源是藉由開關切換來調整輸出電壓，並且藉由儲能元件將輸入能量轉移至輸出，因此在開關切換瞬間在儲能元件上的電壓或電流會含有突波(Spike)。使用於數位控制時會造成整個系統不正常動作。因此必須使用同步取樣的技術來避免取得突波，造成控制器誤動作。電流同步取樣的取樣式在載波信號為最大值或為最小值時觸發類比/數位轉換器對電流取樣，此時會取得電流的平均值以利於回授至數位控制做運算。

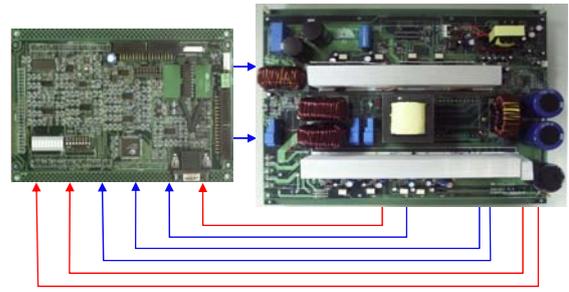


圖 15 數位電源控制IC發展平台

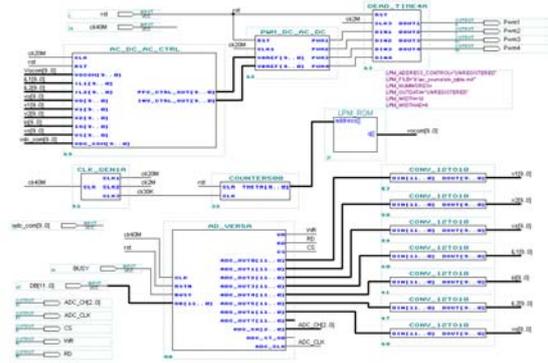


圖 16 數位PFC控制IC電路實現方塊圖

在數位控制實現時，需考慮使用浮點運算或定點運算，浮點運算好處對於數值計算可達到非常精確，但所耗費資源非常龐大；而定點運可在有限位元長度下，使數值計算也可達到一定的精確度。控制器實現以定點運算來處理，首先需針對所設計的控制器參數作整數化。一般微處理器的基本四則運算都是以二進制整數形式來運算，若將微處理器的數值以分數來解釋，則微處理器就具有分數運算的功能。

在發展數位電源控制晶片的過程中，建立一個可以整合各種設計工具的發展平台是非常重要的，其設計過程包含了系統層次的模擬，電路層次的電路設計與模擬，以及整合階段的測試與偵錯。

電路實現與實驗驗證

圖 15 是本研究設計完成的數位電源 IC 實驗測試平台，包含一個以 FPGA 為核心的可程式數位控制器，以及一個額定功率為 2kW 的半橋式兩級功率轉換器，功率級的開關頻率可設定於 16-24 kHz，直流鏈電壓為 300VDC。半橋式交直流轉換器的一個控制問題是上下臂的電容電壓可因為負載不對稱、

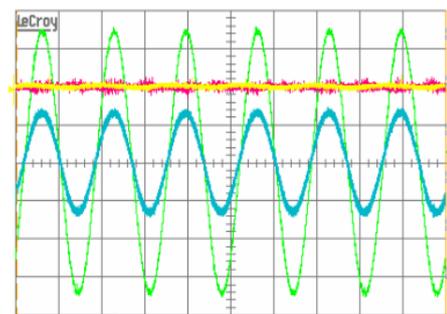
或是電容特性不對稱導致上下臂電壓不對稱，圖 16 是數位 PFC 控制 IC 電路實現方塊圖，圖 17 是實驗系統在穩態與暫態響應的測試結果，額定負載時的功率因數可達 99%，線電流總諧波失真低於 5%。

四、結論與討論

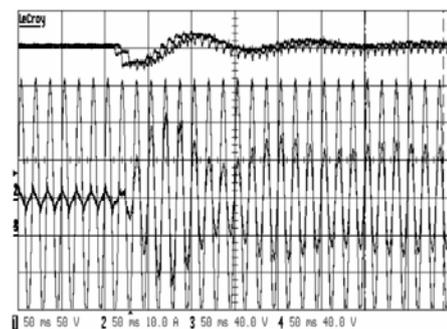
發展數位式電源控制 IC 的困難之一是價格因素。但近年來半導體製造成本已因為晶圓代工使其製造成本日益下降；另一方面，由於未來微電子系統的電源控制與管理日益複雜，在功能需求上，傳統的類比式電源控制 IC 已逐漸無法滿足應用方面的需求，因此數位式電源控制 IC 的設計成為一個逐漸受到重視的研究問題。本計畫針對新一代桌上型電腦系統的電源供應器，設計具有多項功能的數位式電源控制 IC。

本計畫分析及設計單相升壓型功率因數修正的數位控制架構，以升壓型式之轉換器為主要的系統設計依據，在數位控制中，電流迴路是使用預測型死擊控制，使電流具有快響應；電壓迴路控制器採用二階控制器，可有效降低輸出二倍頻對輸入電感電流之失真的影響，探討數位控制器於控制 IC 實現時需考量的一些細節，包含電流同步取樣及定點運算。

使用 PSIM 及 Matlab 模擬及輔助設計數位控制器，由模擬結果可評估功率因數修正器數位控制架構設計的正确性。以利於在未來可使用位數硬體電路實現成泛用於升壓型功率因數修正器的數位控制晶片。超大型可程式數位邏輯閘元件 FPGA 與 CPLD 的興起，使得數位控制方法得以快速地製成數位控制專用 IC 來實現，本研究以 FPGA 實現數位式 PFC 功因控制 IC，利用階層模組化與電路資源共用的觀念設計以降低電路複雜度，達到最佳化的目的，所設計的控制 IC 具有可程式化的特點，經由一個微處理器串列週邊通信界面(SPI)可調整及觀測此控制 IC 內部之參數及變數，實驗結果顯示此控制 IC 的可行性。



(a) 全載時的穩態響應



(b) 從無載切換至全載時的暫態響應

圖 17 交直流轉換器數位式 PFC 控制實驗結果

五、參考文獻

- [1] B. Wilkenson, "Power factor correction and IEC 555-2," *PowerTechnics Magazine*, February 1991, pp.20-24.
- [2] C. K. Duffey and R. P. Stratford, "Update of harmonic standard IEEE-519: IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems," *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 25, no. 6, pp. 1025-1034, Nov./Dec. 1989.
- [3] J. M. Retif, B. Allard, X. Jorda, and A. Perez, "Use of ASICs in PWM techniques for power converters," *IEEE IECON Conf. Rec.*, pp. 683-688, 1993.
- [4] 蔡明發, 蔡國隆, 鄒應嶼, "共水半橋式雙向交直流轉換器數位可程式控制 IC 之設計," 第三屆電力電子研討會, pp. 405-410, Sept. 17-18, 2004.
- [5] Ming-Fa Tsai, Kuo-Lung Chai, Yu-Tzung Lin, and Ying-Yu Tzou, "Design of a digital programmable control IC for common-neutral half-bridge bilateral AC-DC-AC converters," *IPEMC Conf. Rec.*, Xi'an, China, Aug. 13-16, 2004.
- [6] S. L. Jung, M. Y. Chang, J. Y. Jyang, L. C. Yeh, and Y. Y. Tzou, "Design and implementation of an FPGA-based control IC for AC-voltage regulation," *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol. 14, no. 3, pp. 522-532, May. 1999.
- [7] 馮雅聰, "DSP 全數位快速響應單相功率因數修正器之研製," 交通大學碩士論文, 民國 90 年 6 月.
- [8] R. Srinivasan and R. Oruganti, "A unity power factor converter using half-bridge boost topology," *IEEE Trans. on Power Electronics System*, vol. 13, no. 3, pp. 487-500, MAY. 1998.
- [9] 彭偉豪, "DSP 全數位半橋式升壓型功率因數修正器之研製," 交通大學碩士論文, 民國 92 年 7 月.
- [10] P. Kong, Z. Jiang, Y. Liu, and L. Huang, Q. Lin, "A novel high-frequency digital PFC controller with second harmonic compensation," *IEEE TENCON 2004*, Vol. 4, pp. 53-56, Nov. 2004.

可供推廣之研發成果資料表

■ 可申請專利

■ 可技術移轉

日期：95年9月1日

國科會補助計畫	計畫名稱：數位式功率因數修正與脈寬調變控制 IC 之研製(3/3) 計畫主持人：鄒應嶼 計畫編號：NSC 94-2213-E-009-146 學門領域：電力
技術/創作名稱	數位式功率因數修正控制技術
發明人/創作人	鄒應嶼
技術說明	<p>中文： 本技術『數位式功率因數控制技術』針對單相之交直流電源轉換系統發展出可以數位電路實現的 PFC IC 核心技術，可應用於升壓式、半橋式及無橋式三種交直流轉換電路數位控制晶片之設計，採用全數位控制架構，主要包含數位 PWM 產生電路、同步取樣電路、與數位相位補償控制電路。</p> <p>英文： The developed digital power factor correction technique can be applied to single-phase ac-dc converter with unit power factor correction. The developed technique can be used for boost, half-bridge, and bridgeless ac-dc converter for power factor correction and voltage regulation. The developed technique can be used to realize digital PFC control IC.</p>
可利用之產業 及 可開發之產品	開關式電源供應器、電源設備之數位控制 不斷電系統、功率因數改善設備 數位電源 IC、數位 PFC IC、數位 PWM IC
技術特點	<ul style="list-style-type: none"> ● 數位式功率因數控制技術 ● 數位式脈寬調變產生電路、同步取樣電路、數位 IPD 電路 ● 可應用於升壓式、半橋式及無橋式三種交直流 PFC 轉換電路 ● 可應用於數位 PFC IC 之實現 ● 可應用於泛用型數位電源控制 IC 之實現
推廣及運用的價值	數位式功率因數控制技術可廣泛應用於各類需要連接市電之電源設備，本技術提供數位化 PFC IC 晶片設計的系統架構設計與實現方法，並以 FPGA 完成系統整合驗證，可進一步推廣於數位電源控制系統之應用，或提供最為數位式 PFC IC 設計之 IP。

- ※ 1.每項研發成果請填寫一式二份，一份隨成果報告送繳本會，一份送 貴單位研發成果推廣單位（如技術移轉中心）。
- ※ 2.本項研發成果若尚未申請專利，請勿揭露可申請專利之主要內容。
- ※ 3.本表若不敷使用，請自行影印使用。