

# 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(I)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2213-E-009-131-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：國立交通大學電機與控制工程學系

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 93 年 9 月 29 日



## 數位式功率因數修正與脈寬調變控制 IC 之研製(1/3)

### Design and Implementation of a Digital Programmable PFC-PWM Control IC (1/3)

計畫編號：NSC 92-2213-E-009-131

執行期限：92 年 8 月 1 日至 93 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，發展一種結合 PFC 與 PWM 控制方法的數位式可程式控制架構，利用 PFC/PWM 開關信號的同步控制，可降低輸出漣波電壓。本階段主要探討數位式 PFC/PWM 的控制架構，應用於單相系統的開關式電源供應器，其前級主要採用升壓型 PFC 架構，後級則多採用隔離式之前向式(forward)或反馳式(flyback)電路架構，本研究將利用數位控制的優點提出一種精簡的可程式(programmable)與可組合式(configurable)的控制架構，使其可應用於以 PC 為主的開關式電源供應器。本研究將探討數位式 PFC/PWM 控制 IC 的尺規劃與整數運算誤差效應，建立系統化的參數尺規劃設計方法，以電腦模擬分析量化誤差與捨去誤差之效應，並完成以 CPLD 為基礎的實現驗證。

**關鍵詞：**數位電源控制 IC、數位/類比混合模式 IC 設計、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 pulsewidth modulation control can greatly simplify the control circuitry. The rising edge switching of the PFC switch with synchronization of the trailing edge switching of the PWM switch can minimize the output

voltage ripples. During the first year of this project we will make a study on control architectures suitable for the PFC-PWM combination control of off-line switching power supplies. A digital programmable PFC-PWM control scheme has been developed in applications to single-phase switching power supplies with a boost PFC input converter and a flyback output converter. Numerical realization issues for the PFC-PWM control will be studied. Simulation-oriented analysis has been carried out to study the feasibility of the proposed control scheme. Experimental verification will be carried out using a designed CPLD-based programmable digital controller.

**Keywords:** digital power control IC, mixed-mode signal IC design, power factor correction control, pulsewidth modulation control, switching power supply

#### 二、緣由與目的

展望 21 世紀，人類將跨入一個以網路(有線與無線)為基礎的資訊與通訊時代，人們的生活與企業的發展將面臨劇烈的變革。個人電腦和伺服器是通訊網路必備的基本設施，21 世紀的開關電源市場重點將在 3C (Computer, Communication, and Consumer)領域。隨著個人電腦、伺服器、與各種可攜式資訊與通訊設備的發展，間接的帶動了高效率交換式電源供應器的技術發展，新一代的高效率交換式電源供應器的競爭也愈為激烈。新型半導體功率元件、平面電磁元件、大容量電容、與高效能可充電電池的商品化技術日趨成熟，高頻軟開關技術、電腦輔助設計技術、與高功率密度包裝技術將逐漸應用於新一代交換式電源

供應器的設計，分散式電源供應器、模組式功率轉換器、與智慧型電源管理模組在新一代電腦與通訊設備的需求，更將觸發未來交換式電源供應器突破性的發展。

電源的要求就是「輕薄短小、高性能、高可靠度」，更簡單的說就是『高功率密度與高可靠度』。近年來由於功率元件、封裝技術的進步，再加上 CPU 高速化的發展，都直接與間接的促成了積體功率模組 (integrated power module, IPM) 的發展，這其中尤其以 dc-to-dc converter (D2D) 的發展特別值得注意。D2D 的發展將改變小型電源供應器的市場生態，一方面將形成標準型電源 IC 的發展，另一方面也可能促成新興公司的誕生。

1980 年以來，以個人電腦為核心的資訊產業，帶動了國內交換式電源供應器產業的發展，間接的促進了電力電子產業的發展。2000 年之後，以 3C 電源為基礎的電力電子產業發展，將提供國內功率半導體產業有利的發展環境，進一步達成技術與產品的垂直整合。

高性能微處理器的發展與可攜式資訊設備的普及應用，導引了未來電源供應器的發展。由於 CPU 的時脈頻率愈來愈高(如 Pentium IV: 3.2GHz)為了有效的降低其散熱，必須採用更低的供應電壓，另一方面，為了提高電流變化的反應速度，電源供應器的反應速度，電源供應器也必須更接近微處理器。此外，諸如電源管理、動態電壓調整 (dynamic voltage scaling)、分散式電源供應架構等等，均成為未來電源供應器設計的重要問題。簡而言之，電源控制已不再是單純的穩壓控制問題，電源控制已成為一個必須從系統設計考量的電源管理問題(power management problem)。

由於新一代高性能微處理器對電源的需求[1]-[4]，電源控制 IC 也從傳統的單一類比控制方式[5]-[8]，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 [9]-[13]。

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、程式化、與智慧化的方向發展。

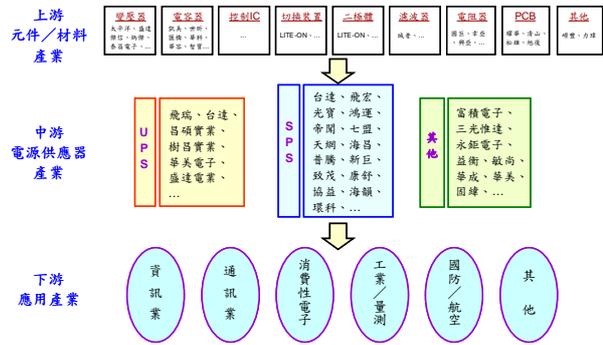


圖1 我國電源供應器的產業分工結構

數位式電源控制 IC 的一個重要的優點是具有可程式化的特色，針對不同的應用，可以軟體方式設定不同的控制參數。這種可程式化的數位控制 IC 已應用於馬達控制如 Angilent 的 HCTL-1020、National Semiconductor 的 LM628 等等。近年來，數位式 PWM 控制 IC 亦成為一個重要的發展議題，具有微處理器通訊介面的 PWM IC 也開始出現。

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。

應用數位控制技術於電源轉換控制已有許多相關的研究，然而大多數是以 DSP 或是 CPLD 實現，其控制架構的複雜度與成本考量均不易應用於低成本的個人電腦電源系統。發展數位式電源控制 IC 必須考慮實際上的功能需求與製造成本，同時必須結合類比/數位 IC 設計技術與電源控制技術。

我國電源供應器的產業分工結構如圖 1 所示，由圖中可看出，我國雖然已是全世界開關式電源供應器的主要提供者，但其中的關鍵元件如 Power MOSFET 與 PWM Control IC，我國仍未具備設計與製造能力。我國近年來由於晶圓代工模式的創新發展，帶動了整體半導體產業的發展，其中 Fabless 的 IC 設計產業發展尤其快速。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，本計畫發展數位式電源控制 IC 的設計技術。

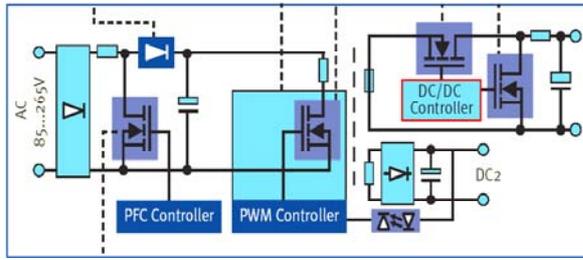


圖2 串接式電源供應器的電路架構

### 三、研究方法與成果

本研究擬發展出一種可應用於交換式電源供應器的數位式控制架構，結合功率因數控制與脈寬調變穩壓控制。圖 2 所示是一個具有功因修正的典型串接式交換式電源供應器電路架構，前級是一個升壓式 PFC 轉換器，中間級通常是前向式(forward)或反馳式(flyback)轉換器，輸出級則是一個同步整流 DC-DC 轉換器。針對這種電路架構傳統的類比式控制 IC 需要三個獨立的控制 IC，若採用數位控制方式，則可將三者合而為一。很明顯的，將這些控制功能予以整合具有許多優點，不僅可達到更佳的穩壓與電源轉換控制效果，也可將控制迴路參數化，易於適用於不同的電源轉換器。

為了處理日益複雜的即時計算，現今的資訊與通信系統伺服器採用了高性能的微處理器、FPGA、與記憶體。計算速度的提升促使時鐘頻率與供電功率的相應增加，例如目前普遍使用的(Pentium IV)，包含了 5,500 萬顆電晶體，工作電壓為 1.7V，時脈頻率為 3 GHz，平均功率約 92W，瞬間最大功率為 110W，最大電流變化率(max. current slew rate)高達 40A/ms。

由於高速微處理器的電源需求日益提高，個人電腦的電源系統已朝向分散式電源的方向發展，圖 3 所示是一種具有容錯能力的分散式電源供應架構。前級通常是一個具有功因控制的 AC-DC 轉換器，以 48V 為共同直流電源，後級則是由數個 DC-DC 轉換器所構成，提供微處理器電源的 DC-DC 轉換器(VRM)必須儘量靠近微處理器，以降低電源線所造成的時間延遲。分散式電源供應架構的發展，以 48V 為分水嶺，朝向兩側發展，前級為具有功因控制的大型 AC-DC 轉換器，後級為眾多且分散的小型 DC-DC 電源模組。

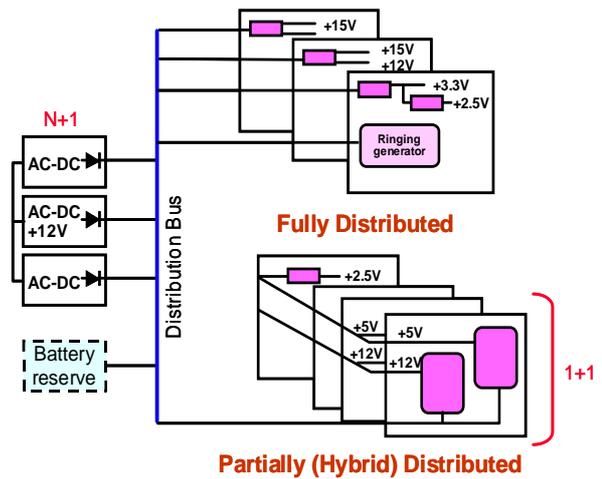


圖3 容錯分散式電源供應架構

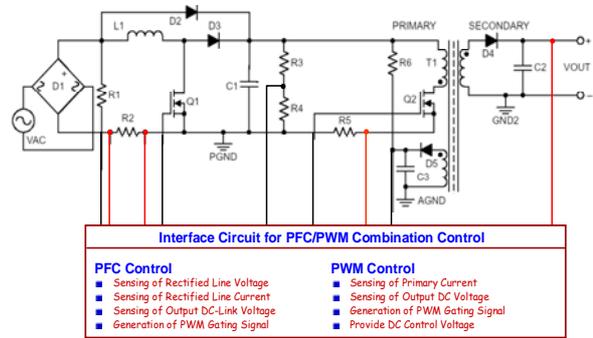


圖4 單相開關式電源供應器的PFC/PWM結合式控制的系統方塊圖

本研究針對前端兩級式 PFC/PWM 電源轉換架構發展具有可程式功能的數位控制 IC。圖 4 所示是一個典型的單相開關式電源供應器的 PFC/PWM 電路架構，前級為升壓型 PFC 轉換器，後級為反馳式 DC-DC 是轉換器，由圖中可以看出整合這兩個轉換器的控制功能，不僅可題高電源品質，也可以提供使用者更多的應用功能。

發展數位電源控制 IC 必須從幾個方向詳加考慮，主要在於市場需求、製造技術與系統設計。發展數位電源控制 IC 的設計，從學術研究發展的觀點而言，具有多項值得探討的問題，例如數位控制架構的發展、混合信號 IC 設計技術、電源管理控制、電源啟動控制、分散式電源並聯控制、與電路精簡化設計的研究等等。

近年來，超大型可程式數位邏輯閘元件 FPGA (Field Programmable Gate Array) 與 CPLD (Complex Programmable Logic Device) 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，本文提出一個以

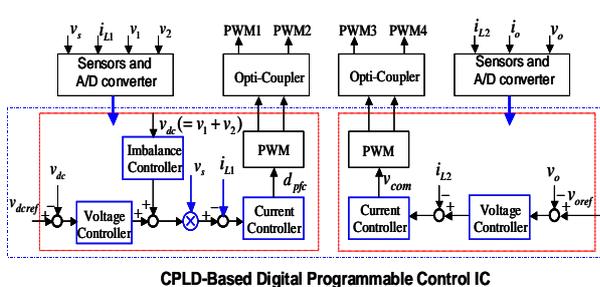


圖5 數位式PFC/PWM結合式控制的系統方塊圖

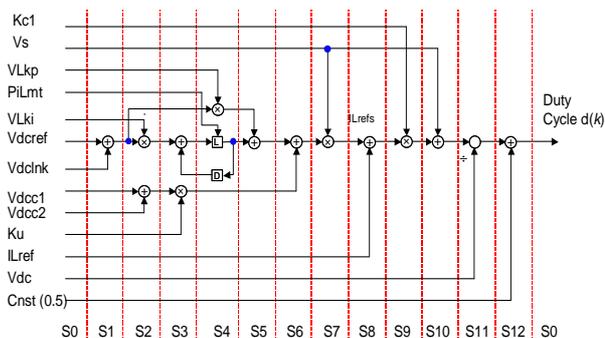


圖7 功因控制器計算分時圖

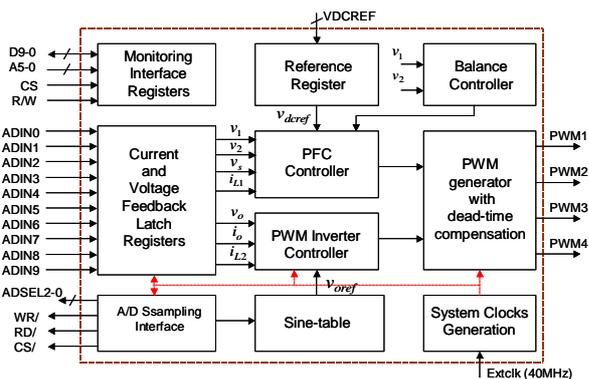


圖6 控制IC內部功能方塊圖

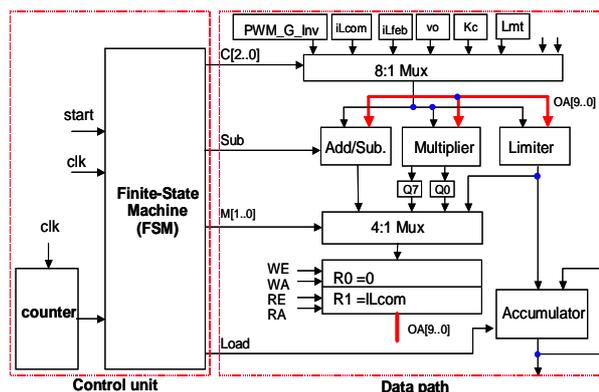


圖8 控制IC控制單元與資料路徑方塊

CPLD 實現共地兩級式 PFC/PWM 交直流轉換器之控制 IC，包含前級功因與後級 DC-DC 控制兩部份，我們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。

圖 5 是本研究所發展的單端(single-ended)兩級式 PFC 交直流轉換器的數位式控制架構方塊圖，圖 6 為此控制 IC 內部功能方塊圖，所採用之控制器架構雖然運算簡單，但可以利用數位電路設計的技巧提高控制迴路的取樣頻率，同時，也利用數位電路的同步特性容易實現電流同步取樣、前後級功率開關相差 90 度的控制功能，極適合以 CPLD 之數位邏輯電路來實現。

圖 7 所示是數位式功因控制法則的計算分時圖，圖 8 是控制 IC 控制單元與資料路徑方塊，圖 9 是所設計的單端式交直流轉換器數位控制 IC 電路圖。圖 10 所示是應用本研究所發展的兩級全數位控制 AC-DC 轉換器的實驗結果，功率級為一個額定 200W 的

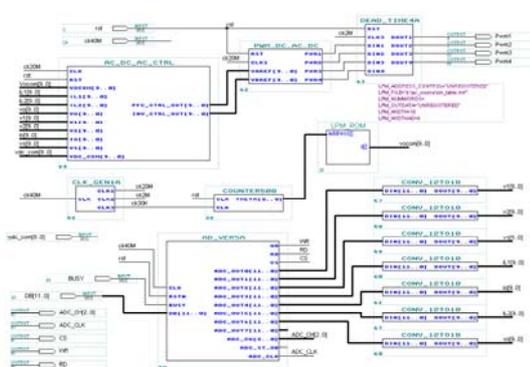


圖9 單端式交直流轉換器數位控制IC電路圖

AC-DC 轉換器，輸出電壓為 48V，負載從無載切換至全載時的輸出電壓暫態響應。

#### 四、結論與討論

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。發展具有商業用途的數位電源控制 IC，將面臨許多技術方面的挑戰，例如為了降低價格、縮小晶片面積，電路設計必須精簡，為了易於應用，必須暫存器方式設定相關的控制參數，同時這些控制參數也必須能夠線上更改與儲存，因此必須具備 on-chip

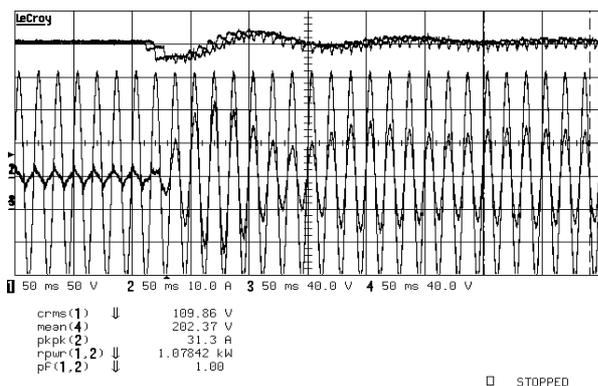


圖10 AC-DC轉換器的輸出電壓暫態響應

的 EEPROM。此外，由於控制晶片與功率轉換電路相當接近，在控制晶片 EMI 防制的相關電路設計，都是重要的考慮問題。

本階段之研究重點在於提出適合 IC 化之數位式 PFC 控制架構，分析有限位元效應，並進行電腦模擬分析、完成 CPLD 數位控制板之設計、數位式 PFC/PWM 控制實驗整合與測試。本研究利用一個 Altera Flex 10K100 之複雜型可程式化邏輯元件(CPLD)實現一個單相升壓型 PFC 可程式控制 IC，依據控制器之計算步驟，本文採用階層模組化與電路資源共用的觀念設計一個資料路徑與一個有限狀態機控制單元以降低電路複雜度，此控制 IC 具有可程式化的特點，可經由同步串列通信界面(SPI)調整及觀測此控制 IC 之參數及變數，實驗結果顯示本文所提出數位控制 IC 設計架構的可行性。

## 五、參考文獻

- [1] Robert J. Huljak, V. Joseph Thottuvelil, Andrew J. Marsh, Bruce A. Miller, "Where are power supplies headed?" *IEEE APEC Conf. Rec.*, pp. 10-17, 2000.
- [2] Alex Lidow, "The power conversion process as a prosperity machine part II - power semiconductor road map," *IEEE APEC Conf. Rec.*, pp. 10-15, 1999.
- [3] B. Moore, "SSI: building compliant power elements for servers," *IEEE APEC Conf. Rec.*, pp. 23-27, 1999.
- [4] Mark. T. Caboriault, "The global market for power supply and power management integrated circuits," *IEEE APEC Conf. Rec.*, pp. 43-48, 1999.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.

- [8] A. V. Peterchev and S. R. Sanders, "Quantization resolution and limit cycling in digitally controlled PWM converters," *Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conf.*, Vancouver, Canada, June 2001.
- [9] 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.
- [10] S. Bibian and H. Jin, "High performance predictive dead-beat digital controller for DC power supplies," *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol. 17, no. 3, pp. 420-427, May 2002.
- [11] J. Xiao, A. V. Peterchev, and S. R. Sanders, "Architecture and IC implementation of a digital VRM controller," *Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conf.*, Vancouver, Canada, June 2001.
- [12] A. M. Wu, J. Xiao, D. Markovic, and S. R. Sanders, "Digital PWM control: application in voltage regulation modules," *Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conf.*, Charleston, SC, June 1999.
- [13] D. M. Van de Sype, K. De Gussemme, A. P. Van den Bossche, and J. A. Melkebeek, "A sampling algorithm for digitally controlled boost PFC converters," *IEEE PESC Conf. Rec.*, pp.1693-1698, 2002.