

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

智慧型直流電源轉換電路與功率管理(I)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC93-2215-E-009-054-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：國立交通大學電機與控制工程研究所

計畫主持人：陳科宏

計畫參與人員：李鴻吉、鄭忠泰、許慶勳

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 94 年 9 月 19 日

中文摘要：

在今日的技術層面中無線通訊(wireless communication)及可攜性裝置(portable device)為大眾所需求，因此低功率設計就變成非常地重要。隨著低功率的設計蓬勃發展，我們甚至可以利用到外界的能量當作我們整個系統的能量來源，亦即所謂的綠色能源(green energy)。利用綠色能源當作我們系統能量的供應意味著此系統是一個永續操作的系統，因此如何轉換以及管理此微量的綠色能源就成為此系統核心的問題，所以我們的研究將提出一個智慧型的直流電源轉換電路，把電源管理理論實現於此永續操作的系統中，使得此系統能夠在最有效率的情況下從外界綠色能源中得到一個穩定的電源供應。

微機電發電機(the generator of microelectromechanical systems) 所產生的能量大約是在 $100 \mu\text{W}$ 範圍，我們可以使用整流器(rectifier)和直流-直流電源轉換器(DC-DC converter)有效率地轉換出所需要的穩定輸出電壓。目前直流-直流電源轉換器的設計方式有交換式直流-直流電源轉換器、整流式電荷灌入式(regulated charge pump)。考量永續操作系統需要高效率能量轉換(high efficiency)、低靜態電流(low quiescent current)、高系統整合(high system integration)、以及低雜訊干擾(low noise)因素之下，一般綠色能源系統都採用交換式直流-直流電源轉換器，雖然雜訊上交換式設計比較大，但在系統電路設計中若採用抗雜訊設計則可減輕此高雜訊影響，因此，此計畫的研究方向也將設計出極低雜訊(ultra-low noise)的交換式直流-直流電源轉換器作為此永續操作系統電源轉換的基本架構。

本計畫要提出的是建立一個智慧型電源管理理論，根據永續操作系統中數位訊號處理的頻率和直流電源轉換電路中的調變的頻率之間變化關係、系統能源使用效率、負載的變化、儲存能量的多寡、決定是在那一種調變技術操作，然則在交換式直流-直流電源轉換器設計上有脈波寬度調變 PWM (pulse width modulation) 和脈波頻率調變 PFM (pulse frequency modulation) 兩種方式。根據輸出負載電流的大小，切換調變方式在脈波寬度調變或脈波頻率調變，當負載輕時操作在脈波頻率調變，負載重時操作在脈波寬度調變，使得電源轉換效率最佳化。再以 Buck 或 Boost 的電路轉換操作，輸出最佳化的 0.9V 至 1.6V 動態穩定電壓輸出，以確保由微機電發電機轉換至系統能量和多餘能量儲存的功率管理效率的最佳化。

關鍵字：無線通訊、整流器、直流-直流電源轉換器、脈波寬度調變、脈波頻率調變

ABSTRACT :

Wireless communication and potable devices are popular in today's technology. Low power designs become more and more important. Owing to the growth of low power designs, we even can use the ambient energy sources for our system. As we know, it is so-called green energy. It also means that this system is a self-sustention operating system using green energy as energy source. Thus, how to convert and manage this tiny energy becomes a major topic in this system's design. Our research aims at a smart DC-DC converter and adapts a suitable power management theory in the self-sustention system. Based on this architecture, this self-sustention can get stable supply energy under the optimal energy transferring efficiency.

The generator of microelectromechanical systems can generate tiny energy about hundreds of μW . We can use rectifier and DC-DC converter efficiently convert the unstable voltage to a

specified and stable output voltage. According to the industry's latest round of DC-DC converters' technology, we can use an inductor-based switching regulator or a regulated charge pump converter. In this self-sustention system, we need high conversion efficiency, low quiescent current, high system integration, and low noise. Thus, a lot of systems with green sources use an inductor-based switching regulator as the DC-DC converter architecture. In order to reduce the disadvantage of higher noise, we can use some low-noise technologies to reduce the influence of the effect. In other words, our research will be an inductor-based switching regulator with ultra-low noise. Based on this architecture, we can develop our power management for this self-sustention system.

This project proposes a smart power management theory. The feedback information from the frequency deviation between the operating frequency of the digital signal processing system in this self-sustention and modulation frequency, utilization of the energy from MESM generator, the deviation of loading, and the capacity of the storage device determine which of the modulation technology we should use. The modulation skills contain PWM (pulse width modulation) and PFM (pulse frequency modulation). According to the loading current, swap the modulation skill between PWM and PFM. When the load is light, the system uses PFM. When the load is heavy, the system uses PWM. It makes the efficiency of the system have the optimal value. Using buck/boost converting skills, we can step-down or step-up the output voltage to the range from 0.9V to 1.6V. Make sure the energy consumed in the system and the energy stored in the storage devices to the best converting efficiency.

A current-mode DC-DC buck converter with on-chip active capacitor multiplier for control system compensation is presented. Current mode capacitor multiplier makes a small capacitor be multiplied to generate a large capacitor effect. Based on TSMC 0.35 μ m technology, we demonstrate that the small capacitor is multiplied by a factor about 201. It allows the control system compensation circuit of DC-DC buck converter be easier integrated on a chip and occupies less chip area. The experimental results show that the efficiency of the current-mode DC-DC buck converter with on-chip capacitor multiplier is about 88%~92% for the load current from 50mA to 400mA when the regulated output voltage is 2V and the output voltage ripple is 12mV.

Keywords: Wireless communication、rectifier、DC-DC converter、PWM、PFM

研究目的：

可攜式資訊設備的廣泛應用，將促成電源、電池、與 SOC 進一步的整合，引發高功率密度的智慧型電源技術的發展，低電壓低功率省電 IC 的發展將愈為重要。然而，除了必須著重於電源供應的功率消耗低之外，如果能有效地使用能源，也就是利用電源管理的方法，更能達到真正省電的效果，而目前大部分的電源管理都使用在 CPU 等大型電路上，像一般的低電壓低功率電路例如手機等，大都是利用待機模式做為省電的電源管理，卻鮮少有將動態電源供應調整(DVS)運用在低電壓低功率的電路上。

Ultra Low Power Wireless Micro Sensing Module

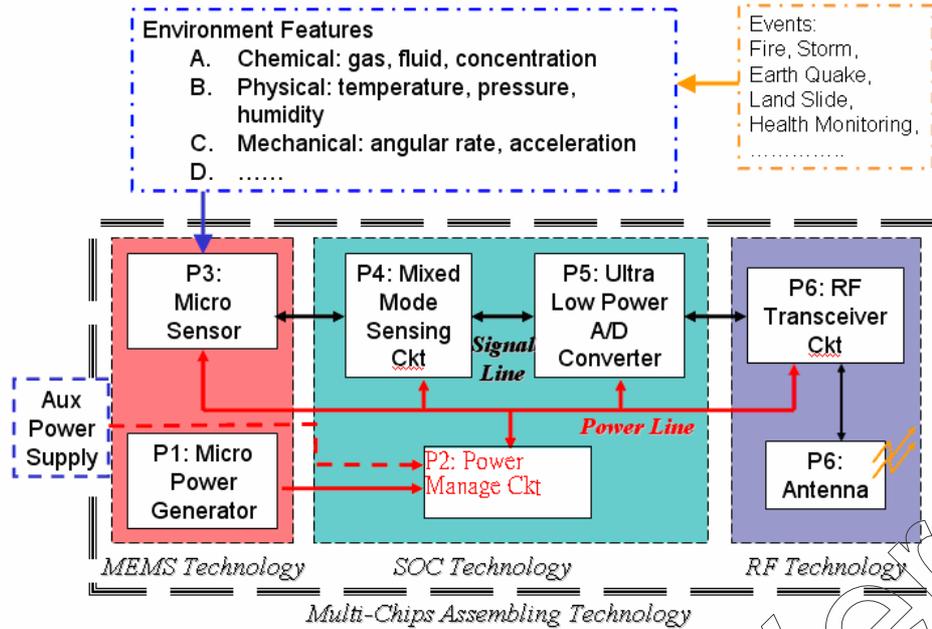


圖 1、低耗能無線微感測模組系統架構

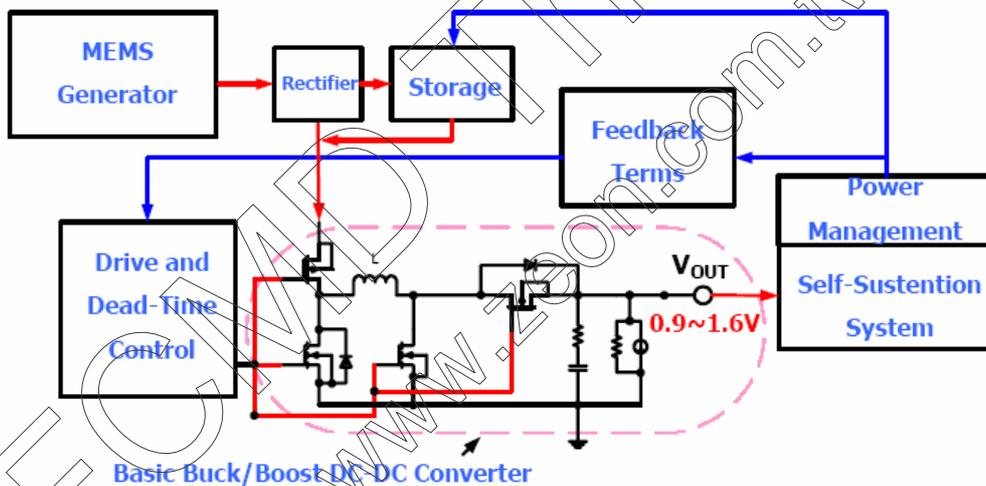
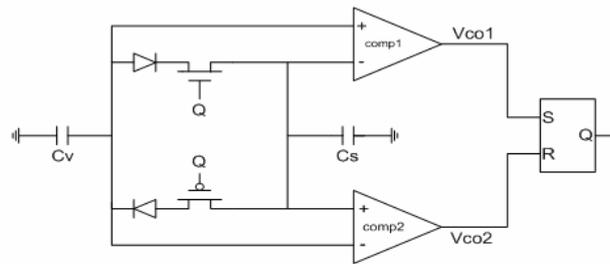


圖 2、智慧型直流電源轉換器與功率管理架構示意圖

研究方法：

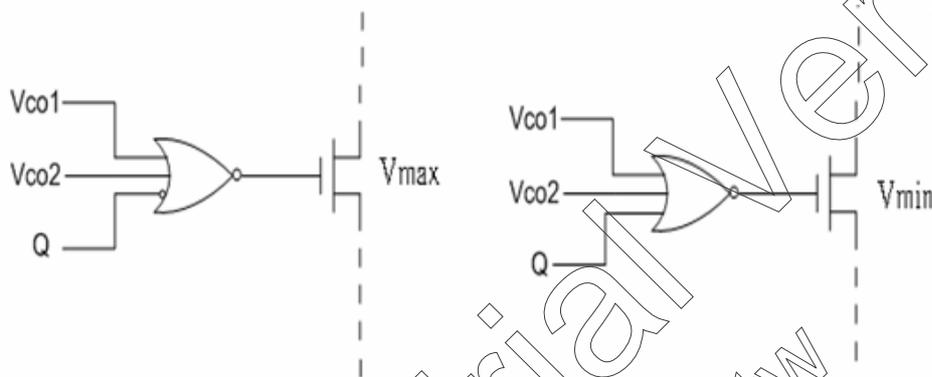
1. 在微機電震動-電能轉換器，用於能量傳輸的開關SW1和SW2 切換的時機將影響能量傳輸的效率，切換的時機分別為 $C_v \max$ 和 $C_v \min$ ，由於無法由物理結構上直接測得 $C_v \min$ 和 $C_v \max$ 的時間點，所以必須藉由觀測電容 C_v 上的電壓峰值來近似切換的判斷 ($V_{\max}=C_v \min$ 和 $V_{\min}=C_v \max$)。

電壓峰值量測器如下圖(a)：



圖(a). 電壓峰值量測電路

由電壓量測的結果再加入邏輯電路的判斷可達到開關在完成值(C_v min 和 C_v max 的時間點)切換的機制開關邏輯電路如下圖(b)：



圖(b). 開關邏輯電路電路

2. 由於微機電震動-電能轉換器中，功率輸出會受到外部震動和負載的變動的影響而呈現不穩定狀態，所以需要動態電源管理(Adaptive Power Management)的機制來提供一個穩定的功率輸出以提高輸出效能，在此提出電流模式控制切換式直流-直流功率轉換器(Current-Mode Control DC-DC Switching Converter)來達到上述的目的。

電流模式控制切換式直流-直流功率轉換器(Current-Mode Control DC-DC Switching Converter)是指一個可以在負載變化的動態情形下提供穩定的輸出電壓給負載的電路，切換式控制的方式與線性調整的控制方式相比之下可以達到較高的效率，但是缺點是其回授控制系統較複雜，而電流模式控制與電壓模式控制相比較其優點則在於它是直接將負載電流作為控制標的，負載的變化對於輸出電壓的影響非常小，且因此控制方式已將負載端電感電流感應出來，可直接利用此感應所得與負載電流成正比的訊號做過電流保護的措施。

整體電路的簡圖如下圖 3：

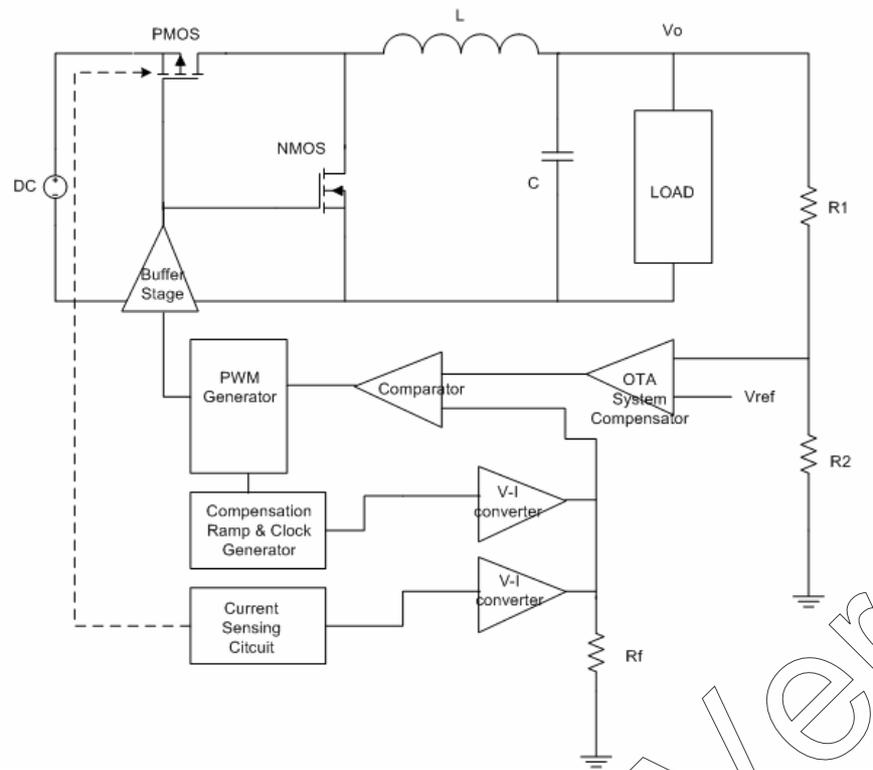


圖 3. 電流模式控制切換式直流-直流功率轉換器簡圖

大致可分為以下七個區塊：

- (1). 功率電晶體(Power MOS)P 型、N 型。
- (2). 轉導放大器暨系統補償器(OTA System Compensator)。
- (3). 電壓至電流轉換器(V-I Converter)。
- (4). 功率開關之觸發時鐘訊號及補償諧波產生器(Compensation Ramp & Clock Generator)。
- (5). 可變脈波寬度波形產生器(PWM Generator)。
- (6). 功率開關推動緩衝級(Buffer Stage)。
- (7). 感應電流器(Current Sensing Circuit)。

主要是以感應電流器感應出流經功率電晶體的電流，將此感應電流回授做開關責任週期的控制，先天上電流模式控制的方式在功率開關的開關責任週期大於 50%時會有不穩定的問題，這是因為當責任週期大於 50%時在開關打開期間充電儲存在電感中的能量無法在剩下的不到 50%的放電期間放電完畢，而導致電感電流在每一次的充放電週期呈現不規則波形，這對於將此電感電流做為控制標的電流模式控制方式會有很大的不良影響，因此必須要有補償斜波產生與感應出來的電流成份相加再進行控制以防止此情形發生，這可以使用電容充放電產生一近似鋸齒波達到斜波補償的目的。在感應電流的產生方面是由 P 型功率開關感應出充電期間的電流，目前已有 CMOS 的應用，作法是利用電晶體三極體區的特性將電流以 1000:1 的比例感應出來，可有效整合在同一顆晶片內部。

3. 傳統切換式功率轉換器皆有一個系統主極點落在輸出端濾波器電容與負載電阻處，造成系統的頻寬減小，因此在系統中必須利用一個轉導放大器輸出端接電阻電容產生一個系統零點，與原輸出端之主極點對消同時產生一個極點作為新的系統主極點，此新

的主極點必須配合整體控制系統的工作頻率設計，使單增益頻率比開關切換頻率小 20% 以避免連波被放大。

傳統的系統補償器如下圖 4：

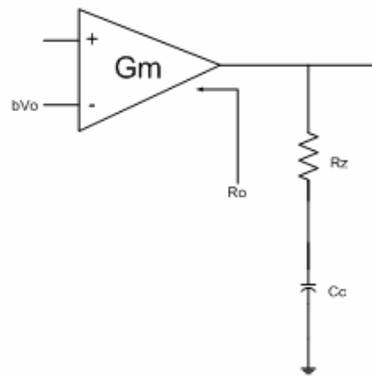


圖 4. 傳統的零點補償產生器

這裡我們的主要目標是要做一個可整合在微機電內部的電流模式控制降壓功率轉換器，將電路的每個方塊以場效電晶體組成之電路實現。在系統的補償方面，雖然傳統的極點、零點對消方式可以有效地補償系統的主極點，但是因為控制器輸出濾波器的電容為 μF 的等級，且負載等效電阻為 10Ω 左右，所產生的系統主極點為 $-2.5k$ 附近，若要產生一個零點與此主極點對消則必須要 nF 等級的電容才足夠，這會使得無法將整體控制電路完全整合在晶片內部，而對於系統整合晶片的應用目標是希望將直流功率轉換器也完全整合在晶片內部，所以在此我們利用電容放大的原理，以小電容創造出大電容的補償效果，以解決此問題。圖 5 為電壓至電流轉換器的電路圖，輸入的訊號先經過電壓位準的調整之後，與電阻作用產生電流，再利用電流鏡將調整位準產生的多餘電流成份減掉，輸出一個完全與輸入訊號成正比的電流訊號。

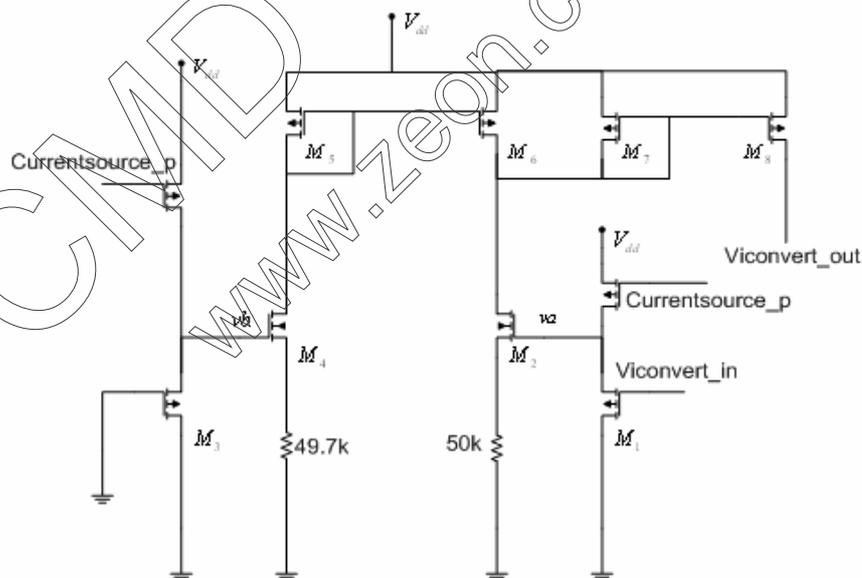


圖 5. 電壓至電流轉換器

圖 6 是功率開關觸發脈波與補償訊號產生器，斜波補償訊號必須是一個振幅與感應電流訊號相同的鋸齒波，因此利用電容充放電的方式並且以參考電壓的輸入定義出此補

償斜波的上緣與下緣之位準，而因為功率開關觸發訊號的恰當時點問題，必須將與補償斜波訊號產生的開關觸發訊號延遲一段時間，以正確地觸發功率開關。

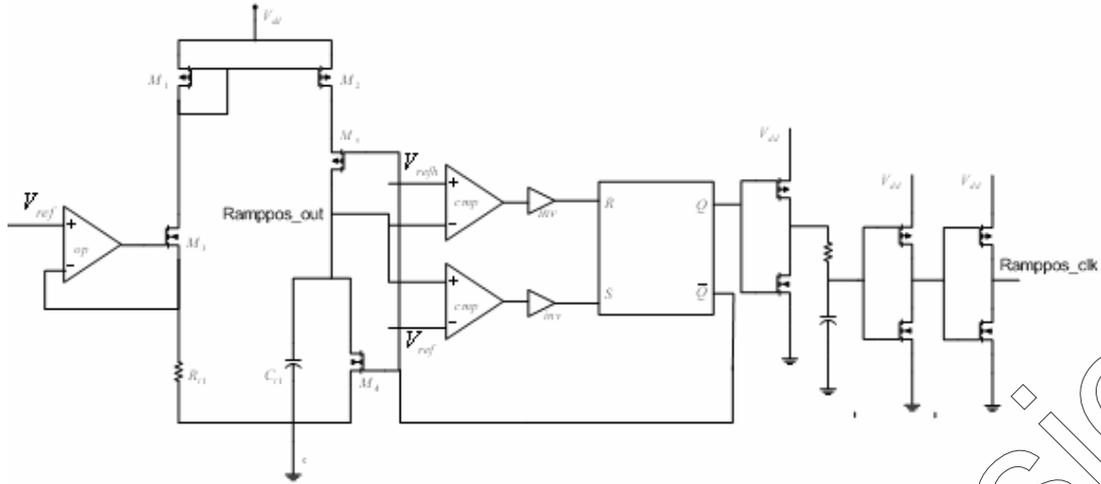


圖 6. 功率開關觸發脈波與補償訊號產生器

功率開關推動緩衝級使用有衝擊電流防止功能的緩衝器形式，以避免 P 型功率開關與 N 型功率開關同時打開造成瞬間功率消耗過大的問題，如圖 7 所示：

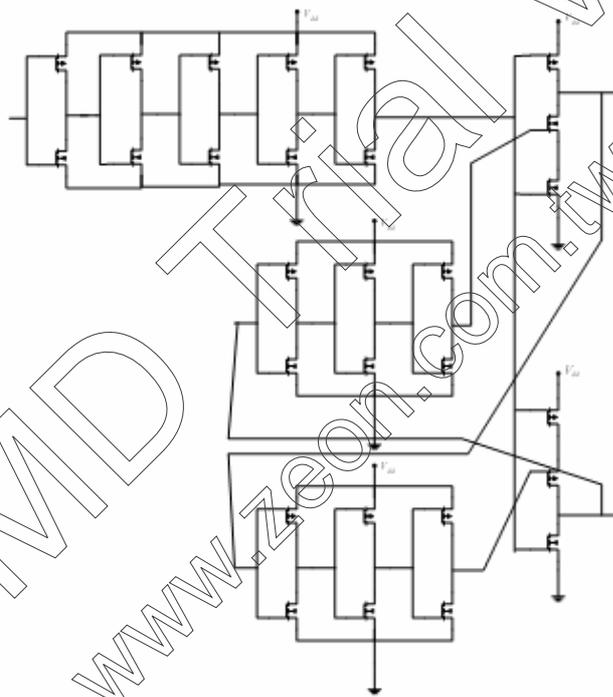


圖 7. 功率開關推動緩衝級

轉導放大器暨系統補償器必須同時肩負起輸出電壓回授與參考電壓比較，並且產生系統補償零點的使命，如前所述，傳統的系统補償器有電容過大的整合問題出現，因此這裡利用電容放大的方式改善傳統系統補償器的問題，圖 8 為此電容放大器與系統補償器的電路架構。

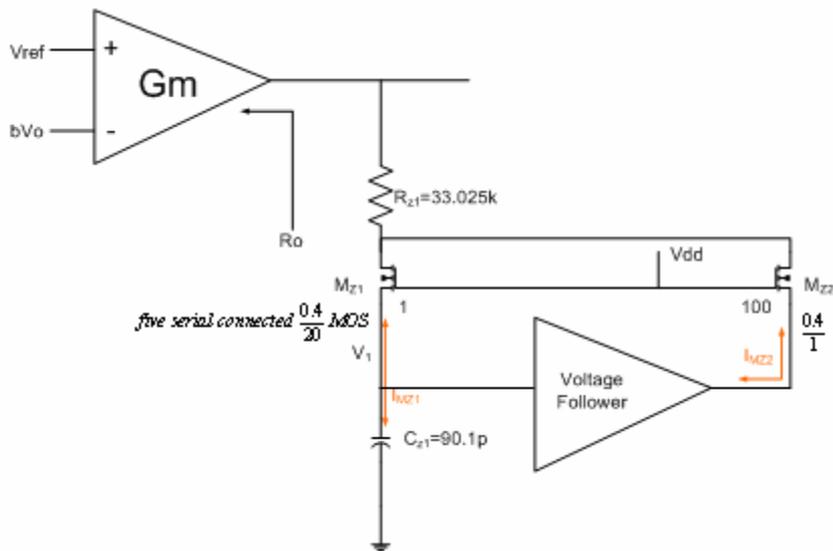


圖 8. 電容放大器應用在系統補償器架構圖

由電容端電壓、電流的基本公式來觀察可發現，我們可以利用放大電容電流的方式使得等效電容值跟著放大，但是流經電容的電流為雙向的小訊號，可知必須有一個可以雙向放大的機制。

此架構的基本原理是利用電晶體在三極體區中類似電阻的特性，將兩個電晶體的長寬比例調整為 100 倍，產生兩個電阻值為 1:100 的電阻，而若是將兩電阻的端電壓強迫相等，則流過小電阻的電流就會是流過大電阻電流的 100 倍。

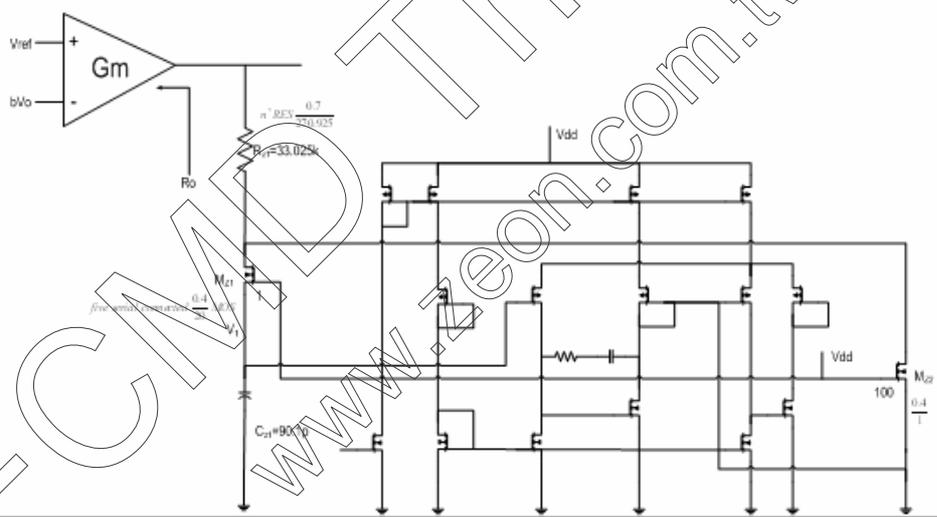


圖 9. 電容放大器應用在系統補償器電路詳圖

因此我們利用一個高精確度、低 offset voltage 的電壓隨耦器來強迫兩個電晶體的端電壓相等，並且使用一個小電容，利用其電容特性並且將其電容特性放大。

4. 針對系統規格訂出每個電路方塊的細部特性，依照此特性設計並且調整電路參數。在系統補償方面必須先訂出負載所需電流的最大值及最小值，針對負載電流最小值及負載所需端電壓計算出等效的最大負載電阻，與濾波器電容一起算出原系統主極點最小值，再利用此補償器的轉移函數零點與原主極點相等，並且加入系統的新主極點配合

功率開關頻率設計所得之電容、電阻值，將此電容值的百分之一作為 C_{Z1} ，電阻作為 R_{Z1} ，這裡因為我們用來放大電容電流的三極體區電晶體存在等效電阻，因此 R_{Z1} 必須減掉此等效電阻，以確保所產生的零點位置精確。

結果與討論：

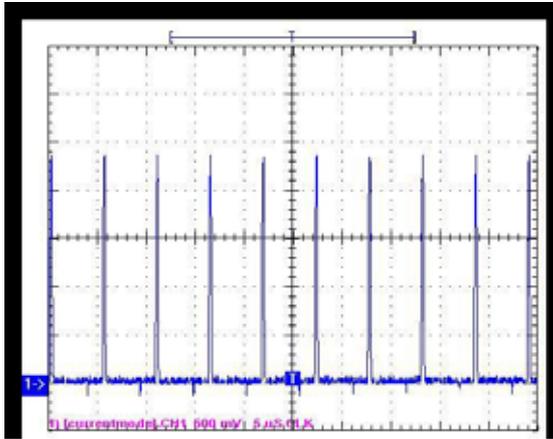


圖 10. 電流感測波形圖

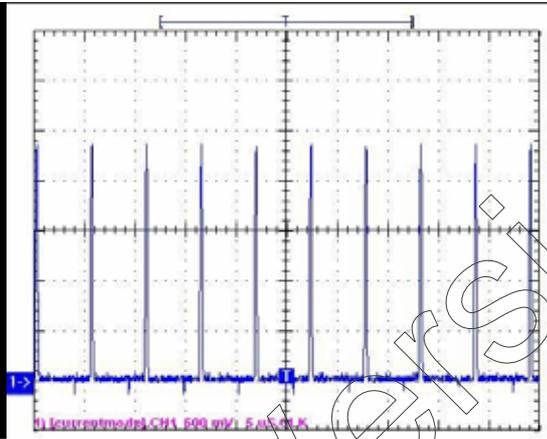


圖 11. 脈波觸發訊號波形圖

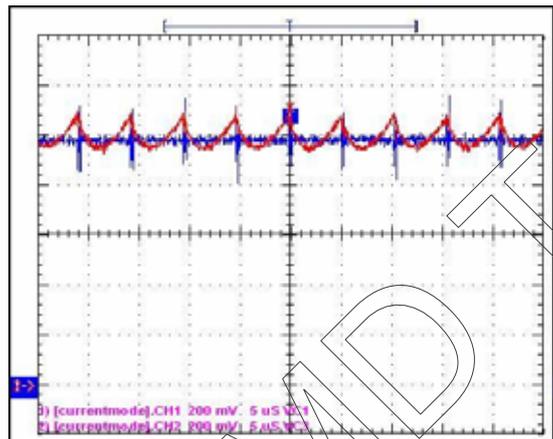


圖 14. 責任週期產生波形圖

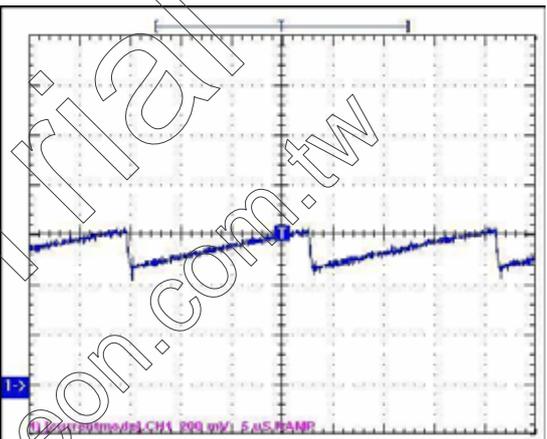


圖 13. 電流模式控制斜波補償波形圖

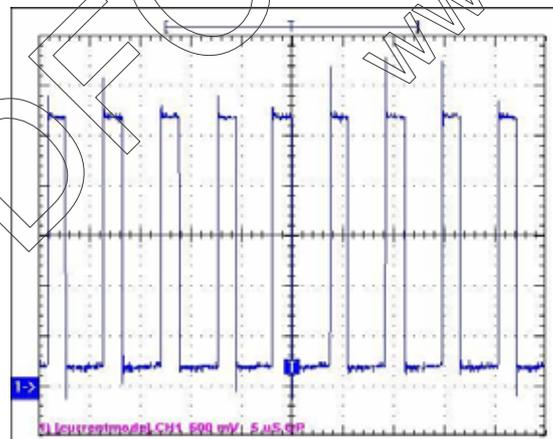


圖 14. 功率電晶體開極控制訊號波形圖

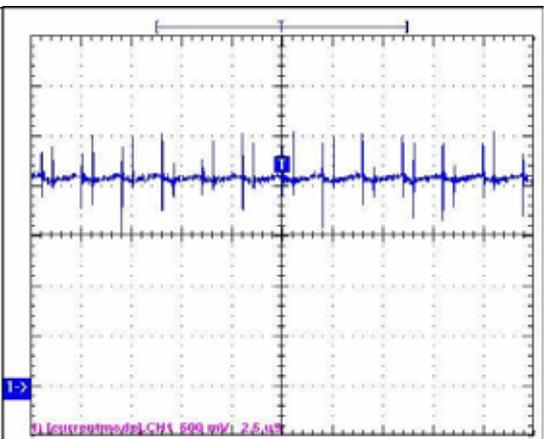


圖 15. 輸出電壓波形圖

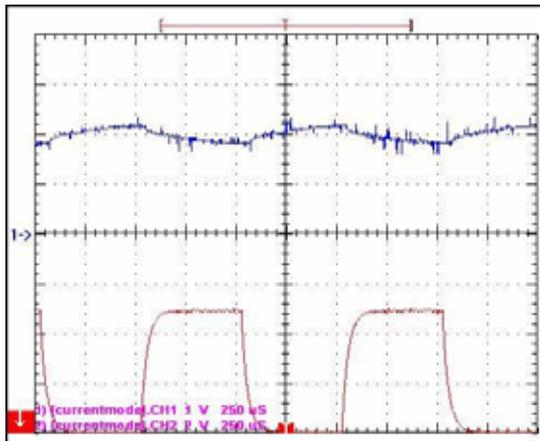


圖 16. 負載變化時之輸出電壓波形圖

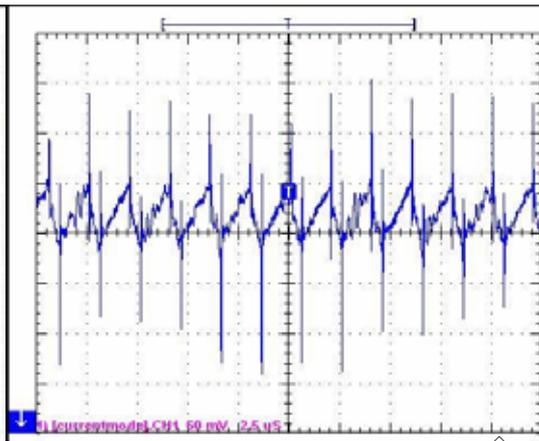


圖 17. 輸出電壓漣波放大圖

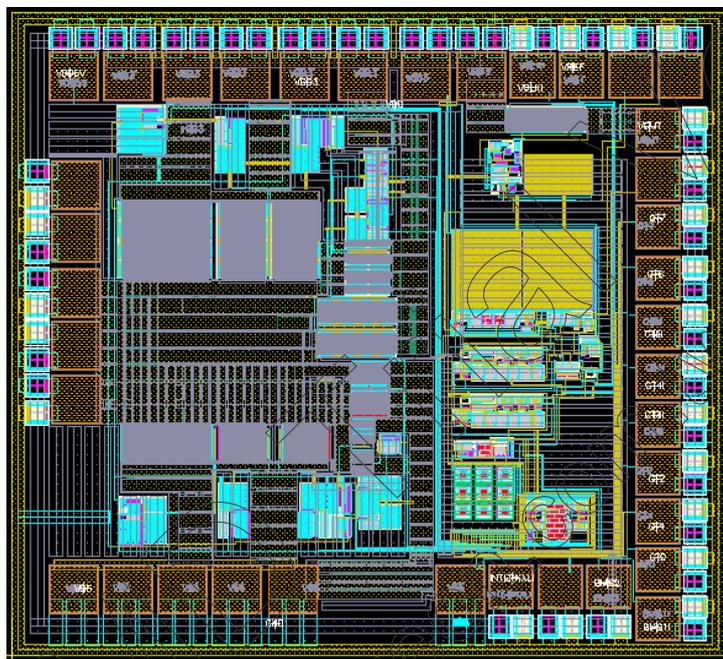


圖 18. 實體 Layout 電路圖

參考文獻：

- [1] Cheung Fai Lee, Philip K. T. "A Monolithic Current-Mode CMOS DC-DC Converter With On-Chip Current-Sensing Technique," *IEEE J. Solid-State Circuits*. vol. 39, pp.3-13, Jan. 2004.
- [2] Makharia, A.; Rincon-Mora, G.A. "Integrating Power Inductors onto the IC-SOC Implementation of Inductor Multipliers for DC-DC Converters," *IECON '03. The 29th Annual Conference of the IEEE*, Vol. 1, pp.556-561, 2-6 NOV, 2003.
- [3] Chen J.-J., Su J.-H., Lin H.-Y., Chang C.-C., Lee Y., Chen T.-C., Wang H.-C., Chang K.-S., Lin P.-S., "Integrated current sensing circuits suitable for step-down DC-DC converters," *Electronics Letters*, Vol: 40, pp.200-201, Issue: 3, Feb. 2004.
- [3] Palumbo, G; Pennisi, S., "A high-performance CMOS voltage follower," *Electronics, Circuits and Systems, 1998 IEEE International Conference on*, Vol: 2, pp.21-24, 7-10 Sept. 1998.