

高功因電子安定器之製作與研究

The Implementation and Study of High-Power-Factor Electronic Ballast

李振興
Jen-Hsing Li

王炳聰
Ping-Tsung Wang
崑山科技大學電機工程系
Department of Electrical Engineering
Kun Shan University
Tainan, Taiwan, R.O.C.
Tel : +886-6-2050518
Fax : +886-6-2050298
E-mail : ljh0906@mail.ksu.edu.tw

姚秉呈
Bing-Cheng Yao

摘要

這篇文章主要是製作與研究高功因螢光燈電子安定器，是一篇實作論文。製作電路包括 EMI 濾波器(Filter)及整流器(Rectifier)，功因校正電路(Power Factor Correction, PFC)，換流器(Inverter)及諧振網路(Resonant Circuit)。就電子安定器的各個電路進行分析與討論，並實測其各項數據，數學分析其電路特性。最後，就現有的缺點進行改進分析與討論。

關鍵詞：電子安定器，高功因，螢光燈。

Abstract

The objective of this paper is to implement and study the high-power-factor electronic ballast for the fluorescent lamps. The implemented circuits include an EMI filter, a rectifier, a power factor corrector, an inverter and a resonant circuit. In this paper, all of circuits are analyzed and discussed. The experimental results are provided. The mathematic analysis of the resonant circuit is also provided. By experiments and improvements, the cost is reduced and the performance is improved.

Keywords: Electronic ballast, High power factor, Fluorescent lamp

I. 介紹

陽光、空氣和水是生存的三要素。光線使我們能看到東西，因此也影響我們的生活作息。西元 1879 年愛迪生發明電燈，從此人類利用電力產生照明。目前照明所需的耗電量約為總用電量的 15%到 20%。愛迪生發明的電燈為白熾燈，目前看來發光效率低，因為節能與環保的訴求，因此需要研發發光效率高與環境污染低的照明設備。目前的照明光源[1-7]分為熱輻射發光、氣體放電發光、固態場效發光與同調發光。熱輻射發光即白熾發光，有白熾鎢絲燈(電燈泡(Incandescent Lamp))及鹵素鎢絲燈。氣體放電發光包括超高壓氣體放電發光、高壓氣體放電發光與低壓氣體放電發光。超高壓氣體放電發光包括超高壓水銀燈，UV 汞燈。高壓氣體放電發光包括水銀燈，高壓水銀燈，複金屬燈，氙氣燈。低壓氣體放電發光包括螢光燈(又稱日光燈，Fluorescent Lamp)，低壓鈉燈。固態場效發光包括電磁燈與二極體燈(LED)。同調發光是雷射光。

白熾燈(Incandescent Lamp)已有一百多年的歷史，一般為家庭使用。其發光原理為電流通過燈絲，加熱燈絲至高溫產生電磁輻射。普通家庭用鎢絲燈泡所發出的可見光約 10%，而產生 72%的熱和 18%的能源損失。鹵素燈泡(Tungsten-halogen Lamp)內填充鹵素氣體，現在用溴(Bromine)。螢光燈(日光燈，Fluorescent Lamp)是一種低壓水銀氣體放電燈，內部填充低壓水銀蒸氣與惰性氣

體，管壁內塗佈螢光層。水銀原子激發會產生紫外線，管壁螢光層受紫外線激發會產生可見光。螢光燈發出的輻射能量，可見光約占 20%到 30%，其餘為熱能。高強度氣體放電燈(High Intensity Discharge Lamp, HID)指較高氣壓下氣體放電產生光線。HID 包括水銀燈，複金屬燈(金屬鹵化物燈)與高壓鈉燈。水銀燈目前使用已日漸減少，改用高壓鈉燈，而複金屬燈則為未來戶外燈的主力。複金屬燈(Metal Halide Lamp, MH)又稱為金屬鹵化物燈，構造外觀和水銀燈相似。高功率的複金屬燈常用於工廠及運動場照明，低功率複金屬燈可用於室內照明。

本篇論文主要是製作與研究日光燈(螢光燈)之電子安定器。最早的螢光燈為預熱啟動型(Preheat-start or switch-start)(約西元 1938 年)，為縮短螢光燈啟動前預熱時間，西元 1944 年發展出立即啟動系統(Instant-start)，西元 1952 年發展快速啟動系統(Rapid-start)。傳統式安定器是屬於電磁式(Electromagnetic)鐵芯線圈安定器，主要構造為一個矽鋼片鐵心以漆包線繞線的抗流線圈。傳統安定器構造簡單、價格便宜、易於維修，但是日光燈會閃爍，對眼睛視力保健有不好的影響。而且傳統安定器功率因數約只有 0.5 到 0.6 左右，又會造成諧波失真。傳統安定器無法一次點亮螢光燈管，必須重複點燈直到點亮燈管為止。為改善這些缺點而發展出電子安定器，因為在高頻操作，所以具有低電磁干擾、高效率、高功率因數、無閃爍及重量輕的優點。因為目前節能省碳的世界趨勢，所以電子安定器是主流趨勢。

其實電子安定器(Electronic Ballast)目前是很普遍的，只要去賣場買日光燈燈具，沒有啟動器的就是電子式安定器。目前最佳的是 T5 型燈具[8]，T5 日光燈燈管口徑比較小，約 1.6 公分，所需填充的水銀也比較少，玻璃與螢光粉也比較少，因此減少物耗，縮小體積，方便倉儲與運輸，減低成本。

本論文的主要取向是實作研究，首先，先製作一高功因電子安定器並實測其各項數據。接著，就電子安定器的各個電路進行分析與討論，並數學分析其電路特性。最後，就現有的缺點進行改進分析與討論。

II. 電子安定器架構與電路動作分析

目前電子安定器電路架構最常採用三段式[1]的，如圖 1 所示，包括 EMI 濾波器(Filter)及整流器(Rectifier)，功因校正電路(Power Factor Correction, PFC)，換流器(Inverter)及諧振網路(Resonant Circuit)。濾波器可防止電子安定器產生的電磁干擾(EMI)進入電源，影響電源品質。整流器則是將交流電轉成直流電源。功因校正電路(PFC)主要將功率因數(Power Factor, PF)調整接近一，則等效負載相當於電阻式負載。可以達到減少諧波干擾與省電功能。換流器(Inverter)將直流通成高頻方波交流電，諧振網路(Resonant Circuit)再將方波交流電轉成高頻弦波交流電。

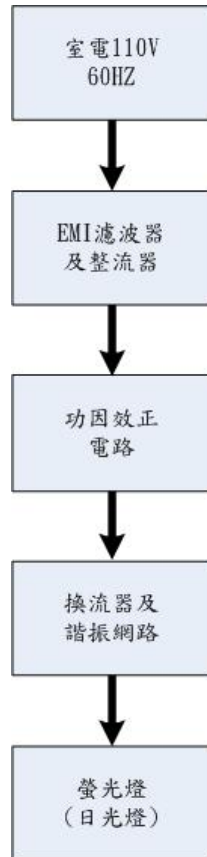


圖 1 一般電子安定架構

以下各個小節將就這三段電路進行分析與討論，有的部份也要進行數學分析與討論。

EMI 濾波器與整流器

EMI 濾波器和整流器電路如圖 2 所示。NTC 是熱敏電阻，可以解決突波電流(Inrush Current)。熱敏電阻是半導體元件，呈現負溫度係數。突波電流進入時，NTC 幾乎開路狀態。突波電流被抑制後，電路正常操作。NTC 與輸入電源串聯，可以保護後面所有元件，避免受突波電流的破壞。電感器 L_1A ， L_1B 與濾波電容 C_1 ， C_2 構成 RFI(Radio Frequency Interrupt)濾波電路，可以防止雜訊干擾電子安定器元件，即可避免誤動作。所以可以防高頻雜訊干擾。編號 D1 到 D4 的二極體(1N4007)構成全波整流電路，將交流電整流成直流電。電容器 C_4 是濾波電容，將弦波直流變成濾波直流。

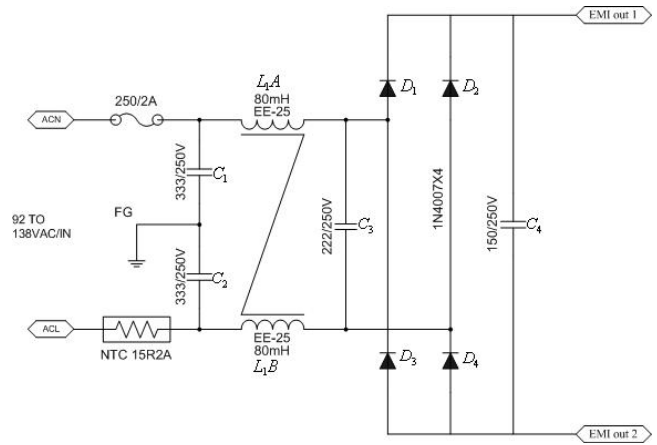


圖 2 EMI 濾波器及整流器(Rectifier)

功因校正電路

功因校正電路如圖 3 所示。這個電路是模仿自 UC3852 這個 IC 的資料手冊，這個應用電路是 100 瓦負載的功率因數校正電路。功因過低時，會有以下的缺點 [1]：(a-1)在電力系統中造成線路傳輸電流變大，增加電力損耗，降低輸電效率。(a-2)降低電力系統的供電容量，因而增加發電成本。(a-3)產生諧波干擾。功因改善可以得到以下優點：(b-1)可以充分利用電源的設備容量。(b-2)降低峰值電流。(b-3)降低諧波成分。(b-4)延長直流側電容的壽命。(b-5)輸入端變壓器可較小體積。(b-6)避免中性線燒毀。

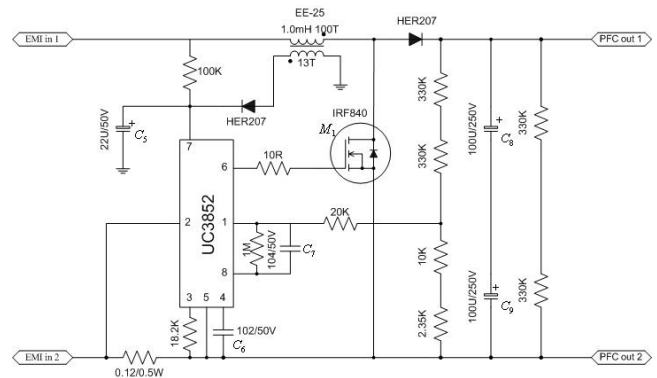


圖 3 功因校正電路

UC3852 是一顆低成本低功因校正 IC，其功能為交流輸入電源吸收較大峰值脈波電流。利用功率開關零電流切換(ZCS, Zero Current Switching)產生升壓轉換。UC3852 是 8 隻 pin 的 IC，其特點如下：(c-1)校正功因最高可達 0.99 以上。(c-2)導通時間(On-Time)升壓(Boost)型 PWM 控制。(c-3)零電流切換。(c-4)峰值輸入電流限制功能。(c-5)最小/最大頻率限制。(c-6)啟動電流低於 1mA。(c-7)高電流 FET 驅動電流輸出。

換流器與諧振網路

圖 4 為換流器(Inverter)與諧振網路(Resonant Circuit)電路。換流器是將整流後的直流電壓經由功率切換元件(BUT11A 電晶體)產生高頻方波，配合電感($L_2 \times 2$)與電容($C_{11} \sim C_{14}$)所組成諧振網路，轉換成螢光燈(日光燈)所使用的正弦電壓電流。RING CORE(8mm, 3T, 2T, 3T)是開關激磁線圈，此為三繞組線圈，是由環形線圈所組成，其中第一個和第三個線圈極性相反，避免開關

Q_1 、 Q_2 同時導通。有時候可以在 Q_1 、 Q_2 電晶體的基極與射極加上旁路電容防止雜訊干擾避免開關誤動作。

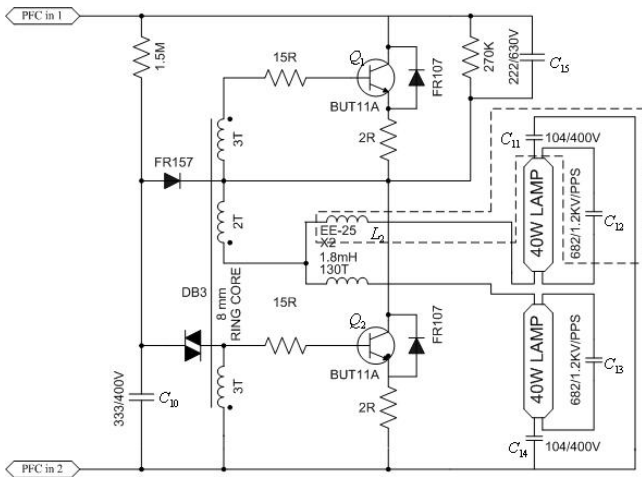


圖 4 換流器及諧振網路

圖 4 的換流器是半橋式換流器 (Half-Bridge Inverter)，需要 2 個功率開關。功率開關需要耐壓一倍的直流電壓，輸出電壓是正負一半的直流電壓。若以功率開關之驅動信號產生的方式歸類，圖四為自激式 (Self-Excited) 電子安定器。自激式電子安定器主要是應用變壓器飽和的原理，形成正回授來驅動切換功率開關，具有零件少、成本低優點。因為切換頻率的決定是由線圈、鐵心的體積來控制，所以切換頻率無法精確控制。又因為切換開關的損失大，需要大體積的散熱片來散熱。所以圖 4 是自激式半橋串聯諧振並聯負載電子安定器。其中三繞組變壓器第一與第三線圈呈相反極性，所以同一時間只有一個電晶體導通。

電路操作程序可分為兩個階段，分別是啟動階段與穩定階段。電晶體 Q_1 、 Q_2 觸發訊號由本身激磁線圈產生，而非外接一組控制訊號。此種電路不可調光 (Dimming)。在螢光燈啟動時，燈管是開路狀態。兩個燈管並聯，假設燈管、諧振電容和電感特性一樣，可以視為等效電路 L_r 、 C_r 、 r_r ，如圖 5 所示。電流流經螢光燈的兩個電極，使電極預熱。電極溫度升高以後，產生電子流。其中交連電容需大於 10 倍的啟動電容。

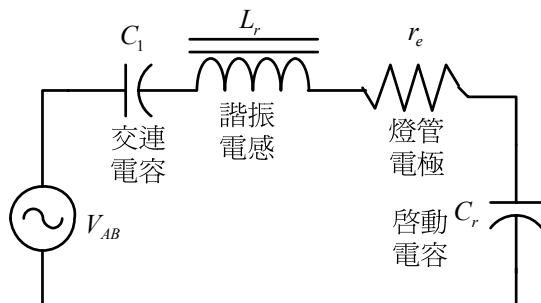


圖 5 啟動模式簡化電路

接著，電極的電子流撞擊燈管內的水銀原子，產生弧光放電，此後電流流經燈管。此時等效電路如圖 6 所示。燈管的等效電路為電阻 R_e 與電容 C_e 的並聯。

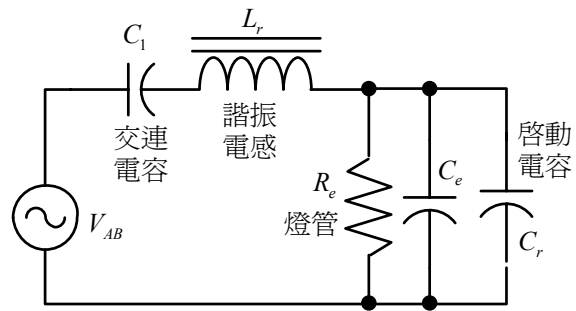


圖 6 穩定模式簡化電路

啟動階段開始約 0.3 秒內，燈管電壓由小逐漸變大。接著約 0.4 秒保持定值。最後 0.3 秒快速變大，峰對峰值達到 1400 伏特，使燈管點亮。點亮後，燈管電壓立即降到 110 伏特穩定電壓，進入穩定階段。

圖 4 電路是串聯諧振並聯負載電路 (Series Resonant Parallel Load, SRPL)，也是目前應用於電子安定器之諧振槽最普遍之架構。諧振電感是 L_2 (1.8mH)，諧振電容是 C_{11} (104/400V) 與 C_{12} (682/1.2KV/PPS)。 L_2 與 C_{11} 形成串聯諧振，在燈管穩態工作時可調節燈管之電壓。在啟動時 L_2 與 C_{12} 諧振，提供燈管啟動時所需之高壓。 C_{11} 有阻隔直流的效果。

半橋式換流器切換元件交替操作時，會在諧振網路兩端施一方波電壓，於穩態時可將直流電源 V_{DS} 和半橋式換流器等效為方波電壓源 V_{AB} ，其振幅為 $\pm \frac{1}{2} V_{DC}$ 且頻率為 ω 。若諧振網路的 Q 值很大，則方波電壓源的高頻成份將被諧振網路衰減，可忽略不計。所以分析可以考慮其基本波則可，為方便理論推導，燈管以電阻 R_F 代替，簡化電路圖如圖 7 所示。

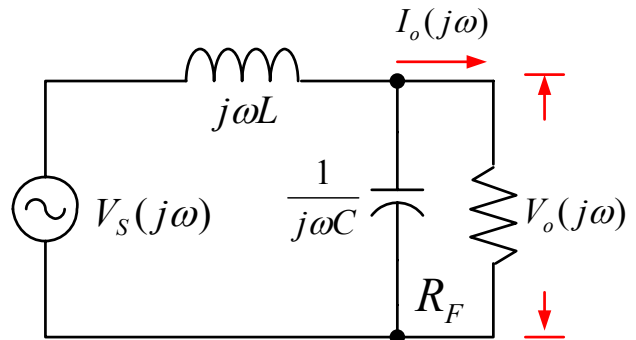


圖 7 並聯負載之簡化電路

其中 V_S 為方波電壓源 V_{AB} 的基本波， V_S 的振幅為 $\frac{2}{\pi} V_{DC}$ 、頻率為 ω 。諧振網路的輸出入轉移函數為

$$T(j\omega) = \frac{V_o(j\omega)}{V_s(j\omega)} = \frac{1}{(1 - LC\omega^2) + j\left(\frac{\omega L}{R_F}\right)} \quad (1)$$

其大小關係式為

$$|T(j\omega)| = \frac{|V_o(j\omega)|}{|V_s(j\omega)|} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)^2\right]^2 + \left[\frac{\omega}{\omega_o Q}\right]^2}} \quad (2)$$

其中轉角頻率(Corner Frequency)為

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3)$$

且品質因素(Quality Factor)為

$$Q = \frac{R_F}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \quad (4)$$

為了確保串聯諧振並聯負載安定器從啟動(Q 值近乎無限大)至穩定(Q 值低)皆具有零電壓切換(ZVS), I_L 之相位必須落後 V_{AB} , 也就是要令切換頻率 ω 高於諧振頻率 ω_r 。若以 V_{AB} 之基本波成份 V_s 作為相位參考, 則輸入諧振網路的電流的相位可表示為

$$\phi_i = \tan^{-1}\left(\frac{\omega}{\omega_o} Q\right) - \tan^{-1}\left[\frac{\frac{\omega}{\omega_o Q}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)^2}\right] \quad (5)$$

能符合 $\phi_i \leq 0$ 條件, 也就是能使 I_L 相位落後 V_s 。將 $\phi_i \leq 0$ 的條件代入(5)式可得到

$$\omega \geq \omega_o \sqrt{1 - \frac{1}{Q^2}} \quad (6)$$

而諧振頻率 ω_r 本身的定義是當諧振網路的轉移函數虛部為零的頻率, 也就是以下方程式的解。

$$\text{Im}[T(j\omega)] = \text{Im}\left[\frac{1}{(1 - LC\omega^2) + j\left(\frac{L\omega}{R_{UV}}\right)}\right] = 0 \quad (7)$$

所以可得

$$\omega_r = \omega_o \sqrt{1 - \frac{1}{Q^2}} \quad (8)$$

由(6)式及(8)式可以證明當切換頻率大於諧振頻率時, 可以達到 ZVS。但 ω_r 隨 Q 值不同而改變, 當 Q 等於無限大時, $\omega_r = \omega_o$, 若 Q 值大於 1 時, 則 $\omega_r < \omega_o$ 。

電子安定器從啟動到穩態期間, 燈管電阻皆隨安定器狀態而變化, 也就是說電路的 Q 值會改變。因此若選擇以 $\omega > \omega_r$ 作為決定 $\phi_i \leq 0$ 的條件, 在實際執行上較困難。但由於 Q 值大於 1 時, ω_r 恆小於 ω_o , 在諧振網路中, 自然頻率 ω_o 和 Q 值無關, 且 $\omega > \omega_o > \omega_r$ 關係恆成立。於是就可以選擇 $\omega > \omega_o$ 取代 $\omega > \omega_r$ 作為決定 $\phi_i \leq 0$ 的條件。通常我們會選擇稍大於 ω_o 作為切換頻率之下限, 保證電子安定器從啟動到穩定皆保持零電壓切換。由以上討論可知, 當半橋式電壓型 SRPL 的切換頻率高於諧振頻率時, 可以使電晶體零電壓切換。另外搭配無損失緩振器可以減少換流器之開關的截止損失。因此此種諧振方式可以同時提供高壓點燈及限流作用。

一般日光燈燈管簡化模型在點亮前等效電阻很大, 而點亮後等效電阻很小。串聯諧振並聯負載(SRPL)電路中 Q 值和負載電阻成正比, 因此在轉角頻率(corner frequency)附近具有負載相依(Load dependent)特性, 其增益在不外加升壓變壓器下符合燈管點亮前高電壓(因增益大, 約五倍)與點亮後低電壓(因增益回到一倍)的需求。

III. 實驗結果

圖 8 是本論文的實驗平台。實驗儀器包括四通道的儲存式示波器, 位於照片的左上方。電源供應器位於照片的右上方, 中間有兩個高壓探棒。最右邊有一台 LCR 表, 可以量測線圈的電感值。電源供應器的上方有一台高頻電流表, 可以和儲存式示波器合用, 以量測電路電流。照片的最左邊有一台三用電錶。四合一功率計沒有出現在照片, 其功能為量測功率、功因、電壓與電流。照片的中間為實驗電路, 即高功因電子安定器。照片的下方為實驗的日光燈(螢光燈)燈管。

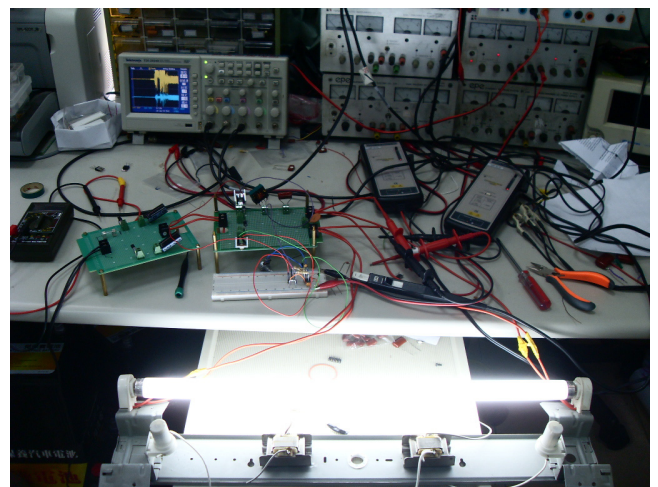


圖 8 電子安定器實驗平台

首先, 我們量測半橋 FET 驅動電路的觸發信號。由圖 9 可以看出上下橋的觸發信號有一個 Dead Time, 可以使

兩個 FET 不會同時導通，保護電路免於短路。圖九觸發信號的觸發頻率約 40KHz 左右。這個頻率大約是共振電路的共振頻率。

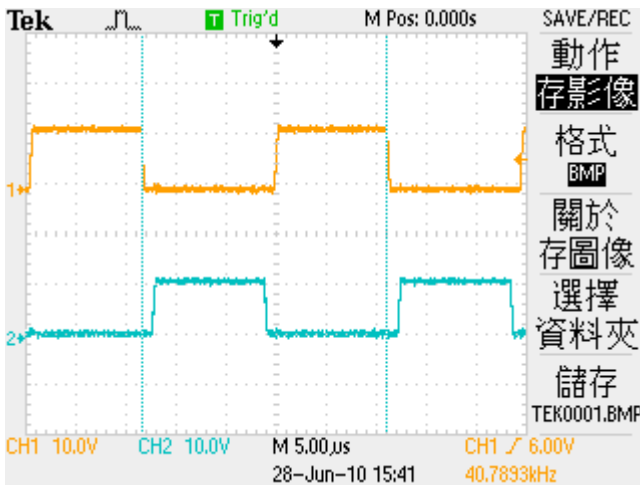


圖 9 半橋 FET 驅動電路之觸發信號

圖 10 是從啟動，點燈到穩態的波形。CH1 是燈管電壓，CH2 是燈管電流。由圖 10 可以看出在啟動過程電壓與電流升高，啟動完成後，電壓電流下降，以控制燈管為穩態電流。啟動電壓約 360 伏特，穩定電壓約 110 伏特。

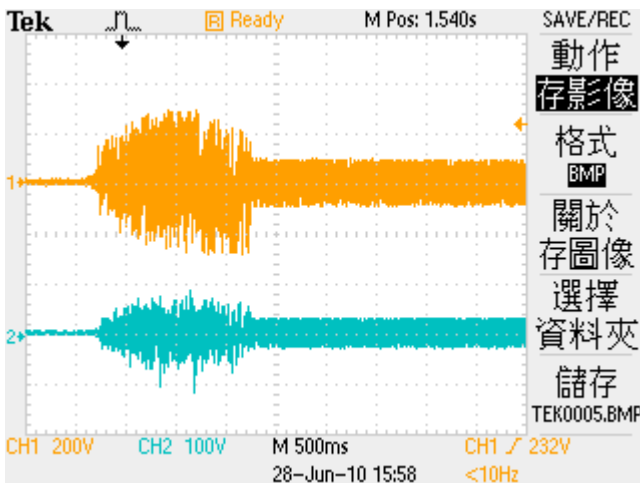


圖 10 燈管兩端之啟動電壓與電流(暫態)

圖 11 為穩態電壓與電流，這個圖形是將圖 10 的波形後段(穩態)取出的圖形。因為有電感與電容，所以電壓電流沒有同相，有一個相位移。

IV. 結論與未來研究

本論文主要是實作研究日光燈的電子安定器，由實驗的成果可以看出與理論相同。實作可以幫助我們更了解電路的作用與製作。在共振槽電路方面，我們使用了多個頻率測試，發現 40KHz 是大約的共振頻率，在這個頻率可以使電路增益放大，達到點燈電壓。當日光燈點亮後，進入穩態的操作範圍，電壓就下降到一般電壓 110 伏特。

未來我們要規畫設計一個螢光燈電子安定器的實驗平台，可以使用微處理器晶片，並可以規劃操作頻率與工作時間。這個工作平台可以驅動日光燈與 UV 燈。藉著這個工作平台，我們將更進一步研究日光燈與 UV

燈的特性與電路設計。

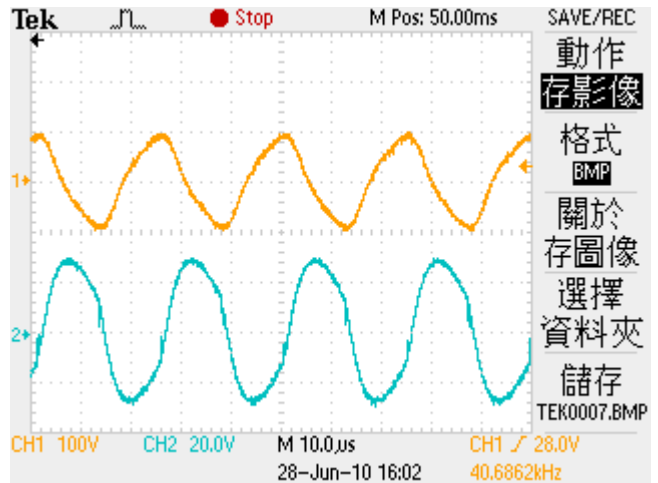


圖 11 燈管兩端之電壓與電流(穩態)

誌謝

感謝國科會計畫補助，編號 NSC98-2622-E-168-022-CC3。感謝南開科技大學張英彬教授及柯聖浩先生的協助與幫忙。感謝國立成功大學梁從主教授贈送授課講義。

參考文獻

- [1] 張英彬、柯聖浩，電子安定器之實作技術，台灣台北，新文京開發出版公司，2006。
- [2] 梁從主，光源驅動電路上課講義，成功大學電機系，2009。
- [3] 吳財福、余德鴻，電子安定器綜論，台灣台北，全華圖書公司，1997。
- [4] 吳財福、余德鴻，劉原全，單級高功因電子安定器，台灣台北，全華圖書公司，1997。
- [5] 康士政，單級高功因電子式安定器之研製，國立成功大學碩士論文，指導教授：陳建富、梁從主，2003。
- [6] M. K. Kazimierczuk and W. Szaraniec, "Electronic ballast for fluorescent lamps," *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol.8, No.4, pp.386-395, 1993.
- [7] M. C. Cosby and R. M. Nelms, "A resonant inverter for electronic ballast applications," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol.41, No.4, pp.418-425, 1994.
- [8] T5 型日光燈網頁，<http://www.t5.com.tw>。
- [9] 張天賜(譯)，電力電子學，台灣台北，東華書局，2004。