

閉迴路降昇壓式轉換器發光二極體驅動電路之設計

Design of Closed-Loop Buck-Boost Converter for LED Driver Circuit

黃啟貞 莊英俊 林士勳
Chi-Jen Huang Ying-Chun Chuang Shih-Shiun Lin

崑山科技大學電機系
Department of Electrical Engineering
Kun Shan University of Technology
Tainan, Taiwan, R.O.C

摘要

本文探討具有昇壓與降壓之升降壓轉換器，使用額定為順向偏壓為 3.1~4.3V、順向電流為 0.7A 之 LED。本文提出驅動 12 個串聯之 3W 白光 LED 負載，單一 LED 電壓控制於 4V、工作電流 0.6A，以交流電 110V 經橋式整流為直流後，再輸入至 LED 驅動電路，操作於降昇壓之連續模式，最後再以 Ispice 軟體模擬之結果加以比較。因 LED 使用時只有 15%~25% 電能轉換成光能，其他電能損失將產生熱使溫度升高，而其內阻隨著溫度而改變，造成電路不穩定，本文提出以閉迴路電壓控制模式穩定輸出電壓。本文首先完成電路架構及工作模式，並以狀態空間平均法導出穩壓控制器之最短穩壓時間之轉移函數，並使用 MATLAB 予以模擬。最後，實驗結果驗證本文所提出並完成閉迴路降昇壓式轉換器發光二極體驅動電路之功率因數等於 0.998。而設計之控制器亦能將輸出電壓穩定於 48V。

關鍵詞：降昇壓、閉迴路、穩壓控制器、功率因數

Abstract

In this paper, the driver with Buck-Boost converter would be study. The specifications of LED used which the voltage and current ratings is 3.1~4.3V and 0.7A individually. The proposed circuit would drive 12 pieces of the 3W white light LED in series. The voltage operated in 4V and 0.6A for each LED, the input AC 110V would be rectified by the bridge diodes to DC, then put it into the driver circuit of LED which would be operated with continue mode of Buck-Boost. These results simulated by the Ispice software to be compared with the experimental circuit. Because of the LED working only 15% to 25% energy converted into light, thus the various resistant by the temperature. A closed-loop controller of voltage would be used in the circuit proposed. The circuit scheme and operation mode would be done first in this paper. To make use of the state-space averaging method to export the shortest time required of the stabilizer. To be simulated by the MATLAB required achieve steady-state controller. Finally, the results show of the LED lighting fixture can achieve a high power factor $pf = 0.998$. It is feasible from the experimental results, and is available at the output voltage controlled at 48V.

Keywords: Buck-boost, closed-loop, stabilizer, power factor

I. 前言

全球能源至今已將耗竭，其價格因此上漲，世界各國除尋求其他能源外，皆紛紛倡導節能減碳政策。在照明用電消耗能源所佔比例不斐，從早期以燈泡為主照明，為節能進步到高功率 LED 光源，為大量推廣使用，不斷提升其發光效率，種類也變得多樣化[6]；用途方面亦非常廣，如車燈、路燈、裝飾等，LED 完全取代傳統燈泡是指日可待的。白光 LED 最早是利用光的三原色所搭配，進一步利用藍光與光學材料激發出白光[7]~[10]，惟其價格成本均無法快速的降低，而無法普及化。利用簡單的電路來驅動 LED 發光器是降低成本的方法之一，早期電源供應器以線性式轉換器為主，隨著科技進步，發展出高效率、體積小的切換式電源供應器驅動電路，而傳統的線性式轉換器以逐漸被淘汰[11]~[12]。切換式轉換器有很多種類，如升壓、降壓、升降壓、邱克式等。轉換器電路主要由半導體開關元件組成，選用正確 IC 將能更有效率驅動轉換器，故切換式轉換器電路之 IC 選用將是非常重要的。轉換器電路中所使用電感器值大小則是影響降昇壓轉換器是否操作於連續電流模式或不連續電流模式。本文提出以連續電流模式來設計，其電容器參數值亦影響輸出電壓的漣波大小；另在開關切換同時會有突波電壓與電流，導致開關毀損，故以緩振電路加以保護[13]~[17]，延長其開關壽命。最後，完成驅動電路後，進行穩壓控制測試，在不同輸入交流電壓(110~130V)電壓及負載變動下，均能獲得穩定輸出電壓。

II. 轉換器之功率因數[1~5]

一個理想的 AC-DC 轉換器，由交流輸入看入時，具有高功因特性；而在輸出時，要具有穩壓特性。

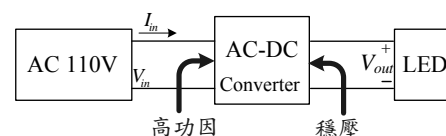


圖 1. 理想之 AC-DC 轉換器電路圖

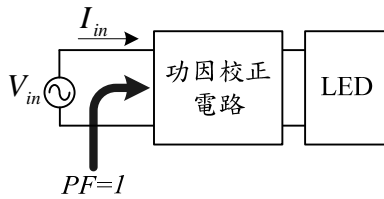


圖 2. 功因校正電路

當送入交流電時，直接至負載時，功率因數低，所以得須加上功率因數校正電路，提高功率因數，提升電源使用率

本文所提降昇壓之閉迴路控制系統主要可分為四個步驟：

1. 首先以降昇壓轉換器操作於連續電流模式與實測功率因數並利用 Ispice 軟體模擬比較[6~8]。
2. 利用狀態空間平均法求出降昇壓轉換器之轉移函數[11~12]。
3. 以 MATLAB 模擬：穩態誤差為零、Phase Margin > 45°、交越頻率操作降昇壓頻率之十分之[16~17]。
4. 驗證此閉迴路系統。

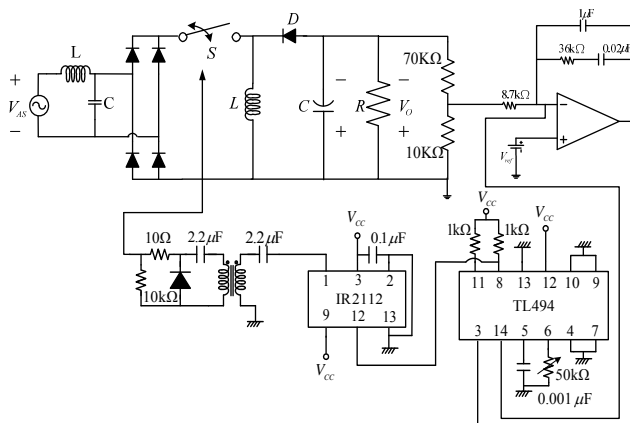


圖 3. 降昇壓轉換器之閉迴路控制系統電路

III. 降昇壓轉換器之實測與模擬

以 300 μH 將降昇壓轉換器操作於連續電流模式並與模擬結果比較如下：

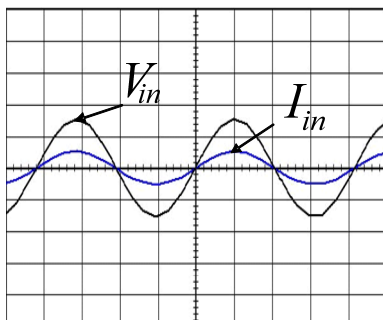


圖 4. 輸入電壓與電流模擬圖

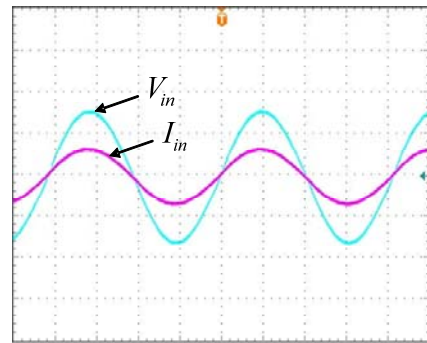


圖 5. 輸入電壓與電流實測圖

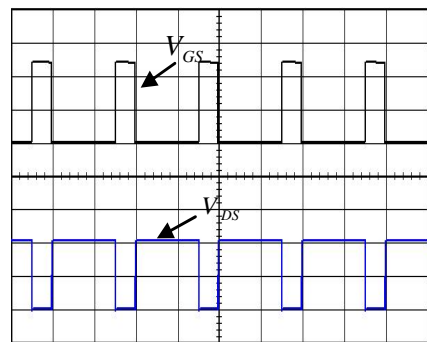


圖 6. V_{GS} 與 V_{DS} 模擬圖

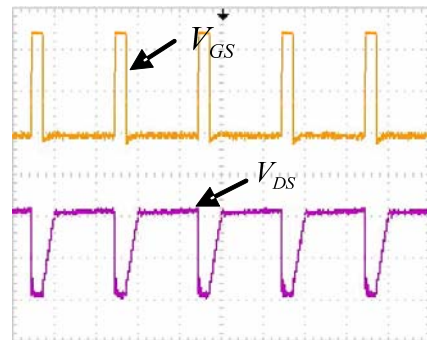


圖 7. V_{GS} 與 V_{DS} 波形

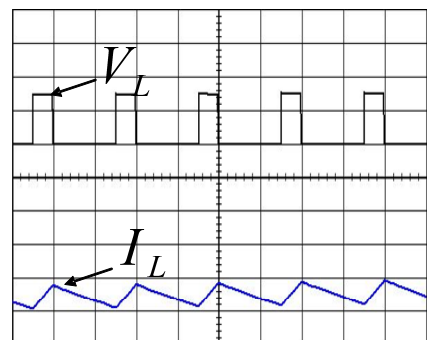


圖 8. 電感電壓與電流模擬波形

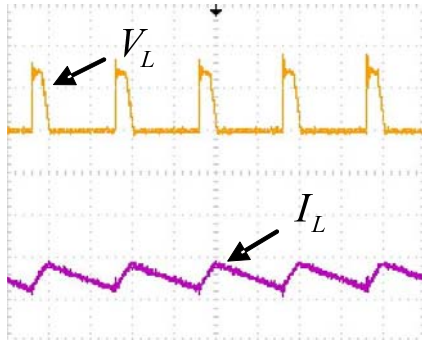


圖 9.電感電壓與電流實測波形

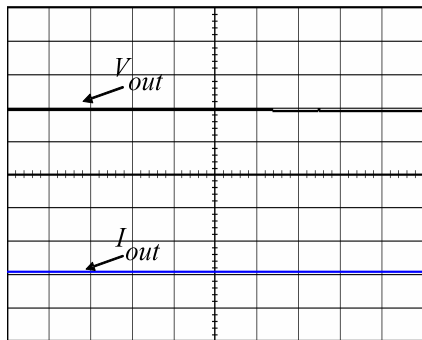


圖 10.輸出電壓與電流模擬波形

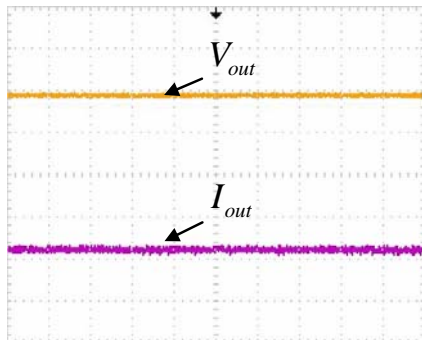


圖 11.輸出電壓與電流實測波形

IV. 降昇壓轉換器之轉移函數

圖 13.為降昇壓之等效電路圖，利用狀態空間平均法來進行小訊號模式分析，因電感和電容本身的阻抗非常的小，不予考慮，其步驟如下：

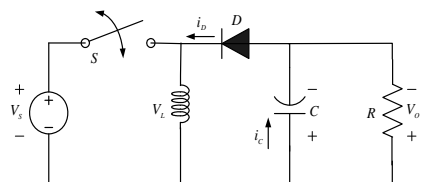


圖 12.降昇壓等效電路圖

Step.1 當電晶體開關 on、二極體 off，如圖 14.所示，動態方程式為

$$\begin{cases} L \frac{di_L(t)}{dt} = v_s(t) \\ C \frac{dv_c(t)}{dt} = -\frac{1}{R} v_c(t) \\ v_o(t) = v_c(t) \end{cases} \quad (1)$$

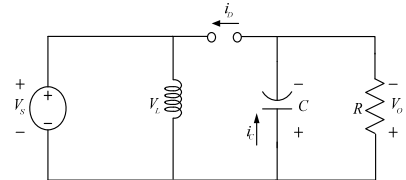


圖 13.電晶體開關導通、二極體截止之等效電路圖

當電晶體開關 off、二極體 on 如圖 9 所示，動態方程式為：

$$\begin{cases} L \frac{di_L(t)}{dt} = V_C(t) \\ C \frac{dv_c(t)}{dt} = -i_L(t) - \frac{1}{R} V_C(t) \\ V_o(t) = V_C(t) \end{cases} \quad (2)$$

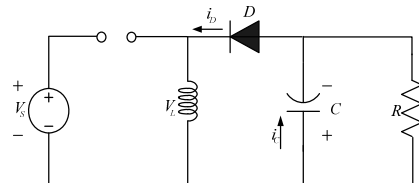


圖 14.電晶體開關截止、二極體截止之等效電路圖

Step.2 對一個週期 T_s 取移動平均得

$$\begin{cases} L \frac{di_L(t)}{dt} = \underline{v}_c(t) - \underline{v}_c(t)d(t) + \underline{v}_s(t)d(t) \\ C \frac{dv_c(t)}{dt} = -\underline{i}_L(t) + \underline{i}_L(t)d(t) - \frac{1}{R} \underline{v}_c(t) \\ \underline{v}_o(t) = \underline{v}_c(t) \end{cases} \quad (3)$$

Step.3 引入小訊號擾動

$$\begin{cases} \underline{i}_L(t) = I_L + \tilde{i}_L(t) & I_L \gg \tilde{i}_L(t) \\ \underline{v}_c(t) = V_C + \tilde{v}_c(t) & V_C \gg \tilde{v}_c(t) \\ \underline{v}_s(t) = V_S + \tilde{v}_s(t) & V_S \gg \tilde{v}_s(t) \\ \underline{d}(t) = D + \tilde{d}(t) & D \gg \tilde{d}(t) \end{cases} \quad (4)$$

Step.4 直流分析：求直流工作點(令微分項為零)得

$$\begin{cases} V_C = -\frac{D}{(1-D)} V_S \\ I_L = \frac{V_C}{R(D-1)} \end{cases} \quad (5)$$

Step.5 交流分析：在直流工作點附近引入小訊號擾動

$$\begin{cases} L \frac{d\tilde{i}_L(t)}{dt} = (V_C + \tilde{v}_c(t))(1-D-\tilde{d}(t)) + (V_S - \tilde{v}_s(t))(D+\tilde{d}(t)) \\ C \frac{d\tilde{v}_c(t)}{dt} = (-I_L - \tilde{i}_L(t))(-1+D+\tilde{d}(t)) - \frac{1}{R} (V_C + \tilde{v}_c(t)) \end{cases} \quad (6)$$

則降昇壓轉換器 $\tilde{i}_L(t)$ 對導通比 $\tilde{d}(s)$ 之轉移函數為

$$\frac{\tilde{i}_L(s)}{\tilde{d}(s)} = \frac{RC(V_S - V_O) + (V_S - V_O) + RCL_L(1-D)}{LRCs^2 + Ls + R(1-D)^2} \quad (7)$$

IV. 穩態控制器設計與實作

圖 15 為降昇壓轉換器之閉迴路控制系統方塊圖，輸出電壓為 $V_O=48V$ ，與參考電壓 V_{ref} 作比較，可得誤差信號 \tilde{v}_e ，誤差信號經由穩壓控制器而得到控制信號，控制信號經過驅動電路轉換為 PWM 的導通比 \tilde{d} ，此信號 \tilde{d} 用以控制切換開關之導通比。將實測值與電路元件參數值代入(7)式，利用 sisotool 建構出系統方塊圖。

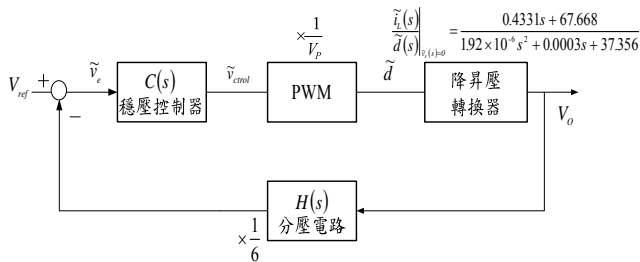


圖 15.降昇壓轉換器之閉迴路控制系統方塊圖

使用 sisotool 建構降昇壓轉換器之閉迴路控制方塊圖，並且使用 PI 控制器完成回授控制。設計穩態控制器必須滿足以下三個條件。

- (1) 穩態誤差為零。
- (2) 相位邊限(Phase Margin、P.M.)必須大於 45° 。
- (3) 交越頻率操作在 $0Hz \sim 8kHz$ 之間。

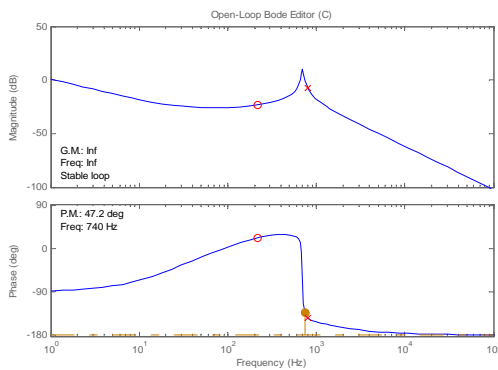


圖 16 相位波德圖

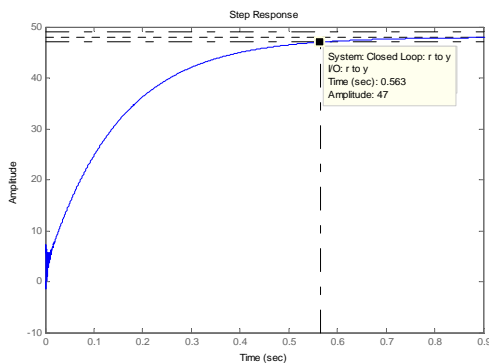


圖 17 頻率響應圖

經由圖 16、17.可知此系統穩態時間為 0.563S，而

相位邊線(P.M.)為 47.2° ，交越頻率操作於 $740Hz$ ，所以此 PI 控制器符合電力轉換器時域所需的規格要求，且可得 $C(s)$ 為：

$$C(s) = 114 \times \frac{(s + 1.38k)}{s(s + 5k)} \quad (8)$$

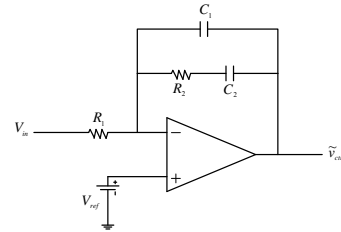


圖 18.二階穩壓控制電路

本文所使用之控制電路為二階穩壓控制電路如圖 18.所示，穩壓控制器之轉移函數 $C(s)$ 為：

$$C(s) = \frac{1}{R_1 C_1} \times \frac{s + \frac{1}{R_2 C_2}}{s(s + \frac{C_1 + C_2}{R_1 C_1 C_2})} \quad (9)$$

利用式子 (8) 可與 (9)，可以求出 $R_1=8.7k\Omega$ 、 $R_2=36k\Omega$ 、 $C_1=1\mu F$ 、 $C_2=0.02\mu F$ ，將以上四種數值代入(9)式，於 MATLAB 再模擬一次是否能穩態，且是否能滿足下列三個條件：

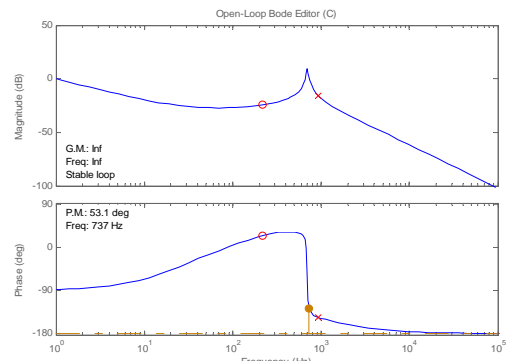


圖 19 相位波德圖

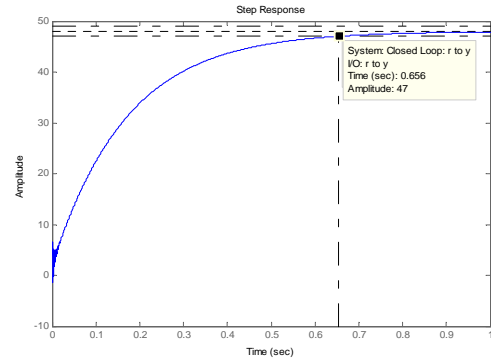


圖 20.頻率響應圖

由圖 19.和圖 20.得知，此穩壓控制器的比例依然可

以穩壓且滿足所有的條件。

V. 閉迴路系統之驗證

降昇壓轉換器之閉迴路控制如圖 3 所示，於輸出負載並聯兩個電阻取 $10k\Omega$ 之分壓為 $8V$ ，參考電壓 $V_{ref}=4V$ ，本小節主要為驗證此閉迴路系統是否能操作於降昇壓轉換器之連續電流模式同時穩壓於 $48V$ ，且無論輸入如何變動、負載由輕載變化為重載或是重載變化為輕載，皆不影響此電路的輸出。

1. 輸入變動之驗證

本小節以改變輸入值驗證，將輸入端從 $110V$ 瞬間增加至 $130V$ 與 $110V$ 瞬間降低至 $90V$ ，皆不影響輸出值，可以證明此閉迴路有穩壓效果。

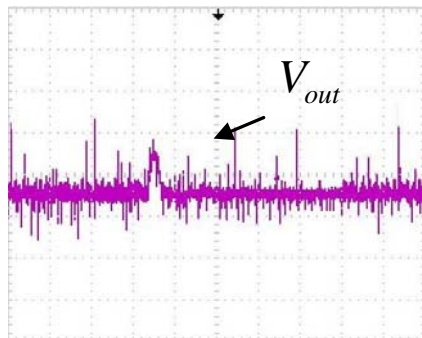


圖 21. 輸入端從 $110V$ 瞬間增加至 $130V$

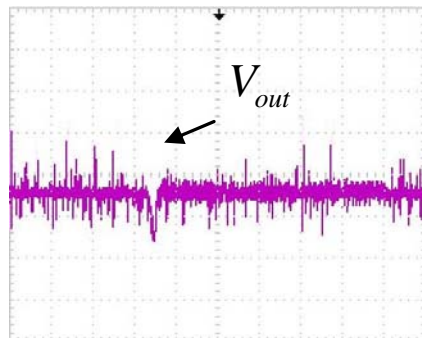


圖 22. 輸入端從 $110V$ 瞬間降低至 $90V$

由圖 21 與圖 22 可以看出當輸入由 $110V$ 瞬間增加到 $130V$ 或者由 $110V$ 驟降到 $90V$ ，皆不影響輸出值，可以證明此閉迴路系統在輸入變動一樣具有穩壓效果。

2. 負載變動之驗證

將輸出端負載電阻從 64Ω 瞬間降低至 32Ω ，與 32Ω 瞬間增加至 64Ω ，皆不影響輸出值，可以證明無論負載如何變化，皆不影響輸出值。

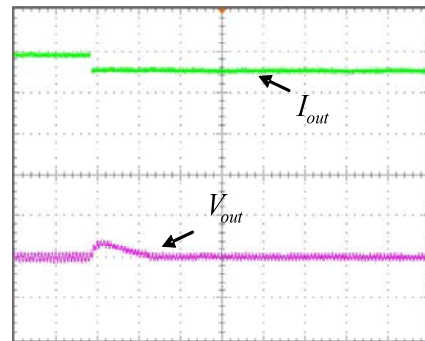


圖 23. 負載電阻由 64Ω 降為 32Ω

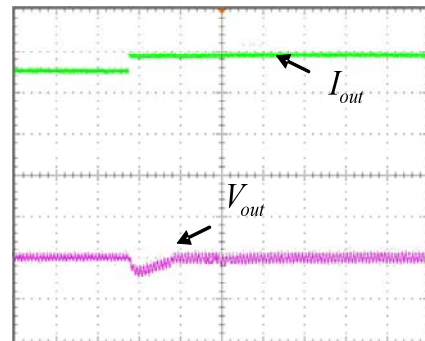


圖 24. 負載電阻由 32Ω 增加為 64Ω

VI. 結論

最後，電路輸出電壓確實能控制於 $48V$ ，從實測的結果，驗證了此電力轉換器具有高功因的性能。而此電路操作於高頻切換，能減少磁性元件大小，使電路體積縮小，成本降低。

參考文獻

- [1] Chia-Chien Hu, "Flyback Converter For Light Emitting Diode Driver Circuit," Department of Electrical Engineering Kun Shan University, thesis, 2009.
- [2] Daniel W. Hart, "Power Electronics", tunghua, 2001.
- [3] Hua-Wei Lin, "Analysis and Implementation of an Isolated SEPIC Converter with High Power Factor Correction," Department of Electrical Engineering Kun Shan University, thesis, 2009.
- [4] M. Dawande & G. Dubey, "Programmable Input Power Factor Correction Method for Switch Mode Rectifiers," IEEE APEC, pp.274-280, 1993.
- [5] J. Lai and D. Chen, "Design Considerations for Power Factor Correction Boost Converter Operating at The Boundary of Continuous Conduction Mode and Discontinuous Conduction Mode," IEEE APEC, pp. 267-273, 1993.
- [6] Hong-Shen Lin, "RGB LED backlighting optical feedback compensation," National Central University Department of Optics and Photonics, thesis, 2005.
- [7] Yu-Lin Shieh, "Application of Textured Coatings to Surface Structure of Blue/Green Light Emitting Diodes," Chang Gung University Institute of Electro-Optical Engineering, thesis, 2007.
- [8] Chuang-sheng Lin, "Array of GaN Based Transverse-Junction Blue Light Emitting Diodes," National Central University Department of Electrical Engineering, thesis, 2008.

- [9] Huang, Yann-Chang, “Light Source Characterization of White-Light LED,”Cheng Shiu University Department of Electrical Engineering, The 7th Taiwan Power Electronics Conference, 2009.
- [10]Ruei-Shiang Hung, “Design and Implementation of Embedded PWM Driving Intelligent Autonomous Car,”National Chung Cheng University Department of Electrical Engineering, thesis, 2005.
- [11]Sheng-yeh Wu, “Analysis and Design of High Efficiency Digital Still Camera Power System,” Feng Chia University Extended Education on Information and Electrical Engineering, thesis, 2005.
- [12]T. Iida, G. Majumdar, H. Mori and H. Iwamoto, “Constant output voltage control method for buck-boost type switched mode rectifier with fixed switching pulse pattern,” in Proc. IEEE ICIT ‘96, pp. 266-268, 1996.
- [13]“Datasheet for U08A60” datasheetcatalog °
- [14]“Datasheet for IRF840” datasheetcatalog °
- [15]3W LED Datasheet , LED-SHOP °
- [16]Jun-Jie Liao, “Study and Implementation of An Integrated Control Circuit for PFC and PWM,” National Cheng Kung University Department of Electrical Engineering, thesis, 2005 °
- [17] Wen-Tsung Hsu, “Nonlinear Analysis of TL494-Based Buck Converter,” National Chiao Tung University Electrical Engineering and Computer Science Program ,thesis ,2006 °