

切換式電源供應器的設計與製造

羅永昌 陳舉綸 賴秋庚

勤益技術學院電機工程系

摘要

傳統線性型電源供應器中的電晶體通常是工作於線性區域，以它作為變阻器來調節不穩定的輸入電壓，在這類型電路中，被動元件必須承受隨著負載而改變的電流，一旦輸入電壓發生變化或是負載突然增加，則被動元件所消耗的功率會隨著變化或增加，使得整個系統之功率損失也隨著提高而讓效率下降。再者，傳統線性型電源供應器由於體積大、重量重、效率低，也不符合追求輕、薄、短、小的產品發展趨勢。

切換式電源供應器(Switch Power Supply, SPS)並非設計工作於線性區域中，因此即使在輸入電壓範圍變化很大，或負載變化很大，仍可以獲得極高的效率。況且由於隔離變壓器的鐵心小，能直接裝置於電路板上，其與傳統線性型電源供應器比較具有體積小、重量輕、效率高等符合現代產品發展趨勢的優點，因此在許多高科技產品皆會選擇切換式電源供應器作電源裝置，尤其在電腦廣泛被使用後，切換式電源供應器更扮演一個舉足輕重的角色。本文的主要目的在於研製一個可減小漣波與雜訊並且能抑制電磁干擾之切換式電源供應器。

關鍵字：切換式電源、返馳式轉換器、交流對直流轉換器設計

1. 前言

本文擬研製一個輸入為 AC 110/220 V、輸出包含 6 組 5VDC/1A 與 1 組 ± 15 VDC/1A、工作頻率為 100KHZ 之切換式電源供應器。通常 AC/DC 轉換器的基本型態有降壓型(Buck)、升壓型 Boost)、及降壓-升壓型(Buck-boost)，而一般切換式電源供應器之組成則包括：(1)輸入整流與濾波電路、(2)高頻直流轉換器、(3)輸出濾波網路、(4)脈波寬度調變(PWM)控制電路[1]。傳統轉換器之調整電壓方式為輸出回授電壓控制，即由振盪電路來提供一個具有固定頻率之脈波寬度調變(PWM)，再利用比較器檢出輸出端直流電壓。所以若輸出電壓 V_o 經分壓網路後的電壓值低於參考電壓 V_r ，表示輸出負載變重，必須增加 PWM 的波寬，亦即加長功率開關的工作週期(Duty cycle)，以補償輸出端的電壓下降而讓輸出端電壓恢復到原來值；同理，若負載變輕，則必須讓工作週期變短，以降低輸出端直流電壓至設定值而達到穩壓之效。但此功率開關的工作頻率並不會因為工作週期變更而改變，換言之此電路的工作頻率永遠是固定的。假如能夠加入一電流內迴路，利用感測電感電流或開關電流之迴授信號來與迴路控制器輸出之電壓控制信號比較，再將比較結果用來控制開關切換的責任週期，則外電路的電壓將可藉由較快速的電流內迴路調整，而獲

得較為快速的動態響應。

在設計電路時是以一高壓隔離型變壓器作為輸入與輸出之間的隔離並且由匝數比來變更電壓，而輸出迴授部份則是使用由光隔離器(Photo-coupler)作為隔離，此外，若輸入為交流電壓，可先經由一個整流濾波電路，如此整個系統則變成 AC-DC 轉換器電路。

由降壓式轉換器衍生出來之電路有：順向式轉換器(Forward Converter)、全橋式轉換器(Full-Bridge Converter)與推挽式轉換器(Push-Pull converter)，而返馳式轉換器(Flyback Converter)則是由昇降兩用型轉換器推衍而得[2]。本文將採用返馳式型，因為其變壓器本身即為一個扼流圈，可做為儲能之用，以下就返馳式基本工作原理加以說明：

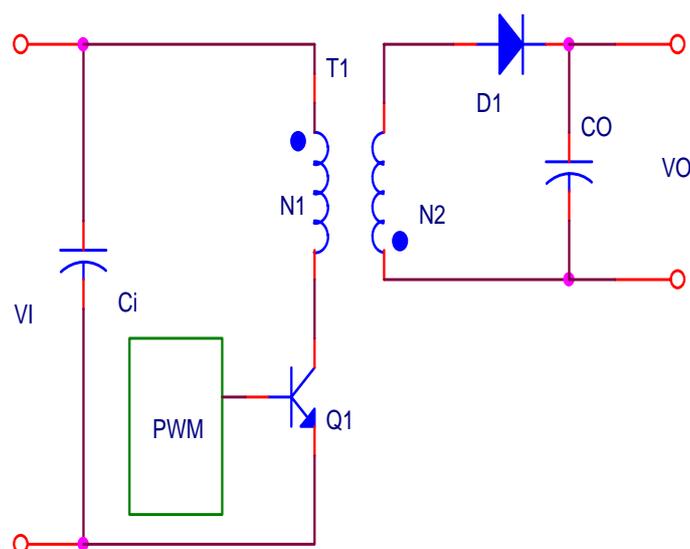


圖 1 返馳式電源供應器轉換電路

當電晶體 Q_1 導通時，變壓器 T_1 之初級繞組 N_1 漸漸地會有初級電流通過，而讓能量儲存於其中，但由於變壓器之一次側與二次側繞組極性相反，使得二極體 D_1 承受逆向偏壓，因此無法將能量轉移至負載，此時之輸出能量則繼續由輸出電容器 C_o 來提供。由於 Q_1 在導通期間，能量是儲存在變壓器中，此時唯有初級繞組是在激勵狀態，故變壓器可視為一簡單之串聯電感器。

當電晶體 Q_1 變成截止時，初級圈之電流會降為零，但因磁通密度 ΔB 無法立即相對的改變，造成變壓器之磁交鏈(NI)並沒有變化。而當磁通密度向負方向改變時，則所有繞組上之電壓極性將會反向，並使得二極體 D_1 導通，而讓磁化電流移至次級圈，亦即將儲存在變壓器之能量經由 D_1 傳送至輸出電容與負載上。由此可得知在返馳式轉換器中，其變壓器除了具有隔離作用與調整所需之輸出電壓功能外，還可作為儲存能量之用。

2. 電路設計

本文使用 Topswitch Family 晶片來設計製作，依據其資料手冊[3]，歸納設計流程如下：

- (1) 輸入電壓 V_s : V_{AC} : 85~135V , 195~265V
- (2) 輸出電壓 V_o =5 V 與 ± 15 V

- (3) 輸出電流 $I_o = 1A$
- (4) 滿載效率 $\eta = 80\%$
- (5) 切換頻率 $f_s = 100KHZ$

根據配置圖及上述規格，將系統化的介紹各組成部分如下：

- (1) 決定迴授電路(Feedback circuit)之輸出基本電壓 V_B

表 1 迴授電路(Feedback circuit)之輸出基本電壓 V_B

Feedback Circuit	V_B	Output Accuracy
Primary/basic	5.7	$\pm 10\%$
Opto/Zener	12	$\pm 5\%$
Optp/Tl431	12	$\pm 1\%$

根據表 1 可知 V_B 應設計為 12V

- (2) 計算輸入濾波電容 (C_{IN}) 與最小直流輸入電壓 V_{MIN}

C_{IN} 可用來降低輸入電壓漣波並減少由諧波產生之傳導性電磁干擾(EMI)

表 2 C_{IN} 與 V_{MIN}

In put(VAC)	$C_{IN} (\mu F / P_o)$	V_{MIN}
100/115	2~3	≥ 90
Universal	2~3	≥ 90
230	1	≥ 240

根據表 2 可知 C_{IN} 值為輸出瓦特的 2~3 倍，因為輸出瓦特為 15 瓦，所以其值應於 $30 \mu F \sim 40 \mu F$ 之間，所以採用 $33 \mu F$ 。

$$V_{MIN} = \sqrt{(2 \times V_{ACMIN}^2) - \left[\frac{2 \times P_o \times (1/f_1) - t_c}{\eta \times C_{IN}} \right]} \quad (1)$$

$$V_{MAX} = \sqrt{2} \times V_{MIN} \quad (2)$$

- (3) 決定反射輸出電流 (V_{OR}) 和崩潰稽納電壓 (Clamp zener voltage V_{CLO})

表 3 V_{OR} 與 V_{CLO}

In put (VAC)	V_{OR} (V)	V_{CLO} (V)
100/115	60	90
Universal	135	200
230	135	200

根據表 3 知當輸入 100/115 V 時， $V_{OR} = 60 V$ 、 $V_{CLO} = 90 V$ 。

(4) 計算一次側參數 I_{AVG} 、 I_P 、 I_R 、 I_{RMS}

$$(A) \text{ 一次側平均電流} \quad I_{AVG} = \frac{P_o}{\eta \times V_{MIN}} \quad (3)$$

$$(B) \text{ 一次側之峰值電流} \quad I_P = I_{AVG} \times \frac{2}{(2 - K_{RP}) \times D_{MAX}} \quad (4)$$

$$(C) \text{ 一次側之漣波電流} \quad I_R = 2 \times \left(I_P - \frac{I_{AVG}}{D_{MAX}} \right) \quad (5)$$

$$(D) \text{ 一次側 RMS 電流} \quad I_{RMS} = I_P \times \sqrt{D_{MAX} \times \left(\frac{K_{RP}}{3} - K_{RP} + 1 \right)} \quad (6)$$

必須注意 TOP 晶片的發熱因素，如果太燙可能會產生誤動作，所以必須設定最小電流值，根據資料手冊知最小電流值應限制為： $0.9 \times I_{LMT} \geq I_P$ 。

(5) 設定漣波和峰值電流之比值 K_{RP} 與輸出功率 P_o

根據資料手冊知 K_{RP} 值通常介於 0.4~1 之間，經過計算結果，其值為 0.9；輸出瓦特值為 15 瓦。 $K_{RP} = I_R / I_P$ ，再利用步驟 4 與 5 來選出 TOP 晶片，應採用 TOP202。

(6) 計算一次側感應係數 L_p 並選擇鐵心和線軸

$$L_p = 10^6 \times \frac{(V_{MIN} - V_{DS}) \times D_{MAX}}{I_R \times f_s} \quad (7)$$

因為輸出瓦特為 15W，利用資料手冊上鐵心的規格表，採用 EER39，其 A_E 與 B_W 值分別為 1.18 cm^2 與 13.6 mm 。

(7) 設定 N_B 及層數 L(一次側)

N_S 之值係指輸出電壓之值，但為考慮影響 N_B 值，所以採用 8 匝，層數越多則會增加所使用電容值，所以採用 1 層。

(8) 計算變壓器一次側和二次側匝數 N_P 與 N_B

$$N_P = N_S \times \frac{V_{MIN} - V_{DS}}{V_o + V_D} \times \frac{D_{MAX}}{1 - D_{MAX}} \quad (8)$$

$$N_B = \frac{V_B + V_{BD}}{V_o + V_D} \times N_S \quad (9)$$

(9) 計算 B_M 值及 L_g 值

$$B_M = \frac{N_P \times I_P \times A_{Lg}}{10 \times A_e} \quad (10)$$

$$L_g = \left(\frac{0.4 \times \pi \times N_P^2 \times A_e}{L_p \times 100} - \frac{L_e}{\mu_r} \right) \times 10 \quad (11)$$

必須注意 B_M 值需介於 2000~3000 之間，不然會造成變壓器鐵心飽和。

(10) 計算 OD、DIA、CMA 值

(A) 一次側最大線徑之直徑(含絕緣) $OD = \frac{BW_E}{N_p}$ (12)

(B) 裸露線徑之直徑 DIA

$$INS = (0.0594 \times LOG(OD)) + 0.0834$$

$$DIA = OD - INS \quad (13)$$

(C) 一次側線電流 $CMA = \frac{CM}{I_{RMS}}$ (14)

根據(A)、(B)兩式可以求出線徑值為 $AWG = 9.97 \times (0.8277 - 2LOG(DIA)) = 32$

$$CM = 2^{(50-AWG)/3} = 64$$

表 4 線徑值

AWG Wire Size	SWG Wire Size	Metric Size (mm)
19	20	0.900
23	23	0.600
26	28	0.400
30	33	0.250
32		0.200

根據表 4，可知線徑要分別採用：AWG #32 0.2mm 與 AWG #26 0.4mm。

(11) 選擇崩潰稽納(Clamp zener)和阻斷二極體(Blocking diode)

表 5 Zener 與 Diode

In put (VAC)	V_{CLO}	Zener	Diode
100/115	90	P6KE91	BYV26B
Universal	200	P6KE200	BYV26C
230	200	P6KE200	BYV26C

當輸入為 100/115 V 及 220V 時選用：

Zener: P6KE91 91V/5W

P6KE91 200V/5W

Diode: BYV26B 400V/1A

BYV26C 600V/1A

(12) 計算輸出電容(Output capacitor)

輸出電容的電流漣波值必須等於或大於 I_{PIPLE}

$$I_{RPPLE} \geq I_{PIPLE} = \sqrt{I_{SRMS}^2 - 1} \quad (15)$$

當輸出為 5 ~ 24 V/1 A 時，電容採用 330 μF /35 V。

由參考式(1)至(15)可設計出擁有 6 組 5V 與一組 ± 15 V 之切換式電源供應器的變壓器與其電路圖中各元件規格而整理列於表 6。

表 6 元件規格

	A	B	C
1	V_{ACMIN}	85	Volts
2	V_{ACMAX}	135	Volts
3	F_1	60	Hertz
4	F_s	100K	Hertz
5	V_o	5,15	Volts
6	P_o	60	Watts
7	η	0.8	
8	Z	0.5	
9	V_B	12	Volts
10	T_c	3	ms
11	C_{IN}	150	μF
12	V_{OR}	60	Volts
13	V_{DS}	10	Volts
14	V_D	0.4	Volts
15	V_{DB}	0.7	Volts
16	K_{RP}	0.9	
17	A_e	1.34	cm^2
18	L_e	70.4	mm
19	B_w	13	mH/T^2
20	M	1	mm
21	L	1	mm
22	N_S	5	
23	V_{MIN}	95.48	Volts
24	V_{MAX}	190.92	Volts
25	D_{MAX}	0.41	
26	I_{AVG}	0.7855	Amps
27	I_P	3.4834	Amps
28	I_R	3.1351	Amps
29	I_{RMS}	1.3567	Amps

30	L_p	111.79	μH
31	N_p	52	
32	N_B	11	
33	B_M	881.68	Gauss
34	BW_E	13	mm
35	OD	0.25	mm
36	INS	0.04764	mm
37	DIA	0.20236	mm
38	AWG	32	AWG
39	CM	64	Cmils
40	CMA	47.13	Cmils/Amps
41	I_{SP}	36.2274	Amps
42	I_{SRMS}	16.9264	Amps
43	CM_S	798.474	Cmils
44	AWG_S	21	AWG
45	N_X	14	

(13) 過電流保護設計

$$(A) \quad V_o = V_{VR2} + V_{D8} + V_{LED} + V_{R1} \quad (16)$$

$$= 13 + 0.65 + 1.2 + (3.57 \times 10^{-3} \times 40) = 15 \text{ V}$$

$$(B) \quad R_8 = \frac{V_{VR3} \times R_7}{I_{OT} \times R_6} \quad (17)$$

$$= \frac{5.1 \times 40.2 \times 10^3}{1 \times 0.1} = 2.05 \text{ M}\Omega$$

$$(C) \quad N_B = \frac{N_P \times (V_B + V_{D3})}{V_{MIN}} \quad (18)$$

$$= \frac{31 \times (9 + 0.7)}{92} = 4 \text{ 匝}$$

$$(D) \quad V_{BMAX} = \left(V_{MAX} \times \frac{N_B}{N_P} \right) - V_{D3} \quad (19)$$

$$= \left(375 \times \frac{8}{59} \right) - 1 = 23.43 \text{ V}$$

$$(E) \quad V_{CE} = V_{CD4} - (V_{VR4} - V_{BEQ1}) \quad (20)$$

$$= 10 + \left(\frac{8}{31} \times 187 \right) - 0.4 - 0.65 = 62.2 \text{ V}$$

$$(F) \quad V_{BSMIN} = \left(V_{MIN} \times \frac{N_S}{N_P} \right) - V_{D4} - V_{BEQ1} \quad (21)$$

$$= \left(92 \times \frac{8}{31} \right) - 0.4 - 0.65 = 22.1 \text{ V}$$

將上述的設計結果繪製成完整的切換式電源供應器電路圖如圖 2 所示,其輸入為 AC 110/220 V、輸出包含 6 組 5VDC/1A 與 1 組 $\pm 15\text{VDC}/1\text{A}$ 、且設定工作頻率為 100KHZ。而所使用的零件則整理於表 7。

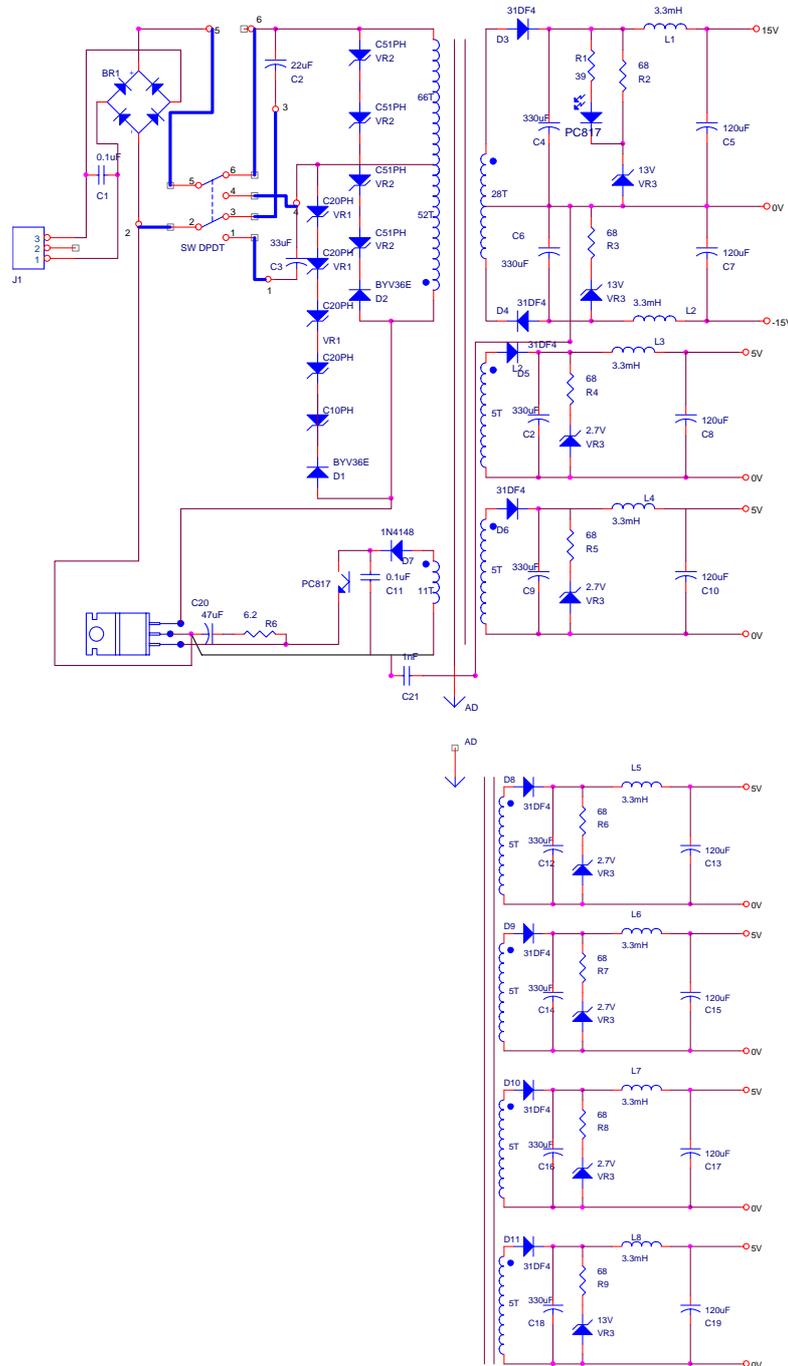


圖 2 切換式電源供應器之完整電路圖

表 7 圖 2 電路圖之零件表

Reference	Value
BR1	600V/3A
C1,C11	0.1 μ F
C2	22 μ F
C3	33 μ F
C4,C6,C9,C12,C14 C16,C18	330 μ F
C7,C8,C10,C13,C15 C17,C19	120 μ F
C20	47 μ F
D1	BYV36E
D2	BYV36E
D3,D4,D5,D6,D8,D9 D10,D11,D12	31DF4
R1	39
R2,R3,R5,R7,R8,R9	68
R6	6.2
VR1	C20PH
VR2	C51PH
VR3	2.7V
F1	2A/250V
L1,L2,L3,L4,L5,L6 L7,L8	3.3mH
T1	EER39

3. 負載測試實驗

圖 3 所示為輸入電壓為交流 110 V，在 15 伏特直流輸出端執行負載測試的輸出電壓-電流之關係圖。其負載電阻分別為：開路、50、40、20、15 歐姆電阻，而相對應的輸出端電壓則分別為：15.1 V、15.04 V、15.03 V、14.97 V、14.92 V，所得到的電壓變動率分別為：0.667%、0.267%、0.2%、-0.2%、-0.53%。

圖 4 所示為輸入電壓為交流 110 V，在 5 伏特直流輸出端執行負載測試的輸出電壓-電流之關係圖。其負載電阻分別為：開路、50、40、20、15 歐姆電阻，而相對應的輸出端電壓則分別為：5.1 V、4.92 V、4.88 V、4.65 V、4.51 V，所得到的電壓變動率分別為：2%、-1.6%、-2.4%、-7%、-9.8%。

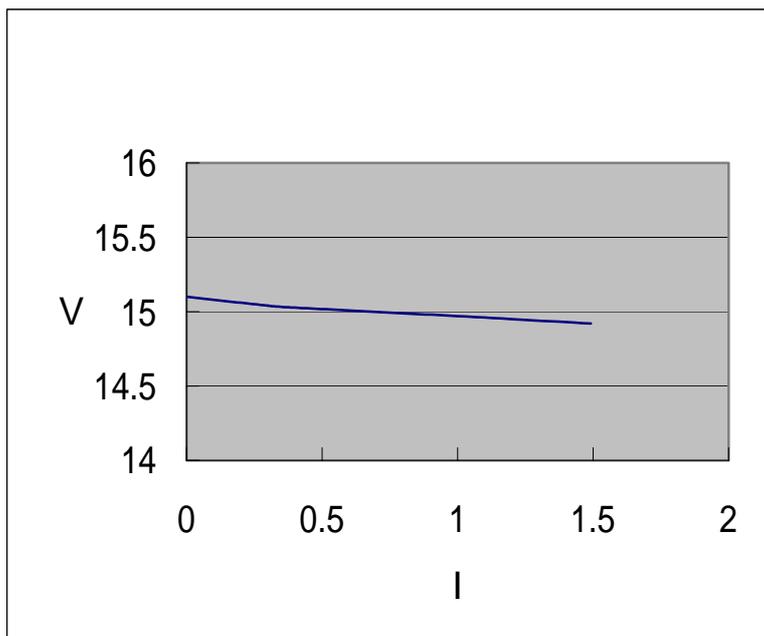


圖 3 輸入 110 V 時之 15V 輸出端的負載測試

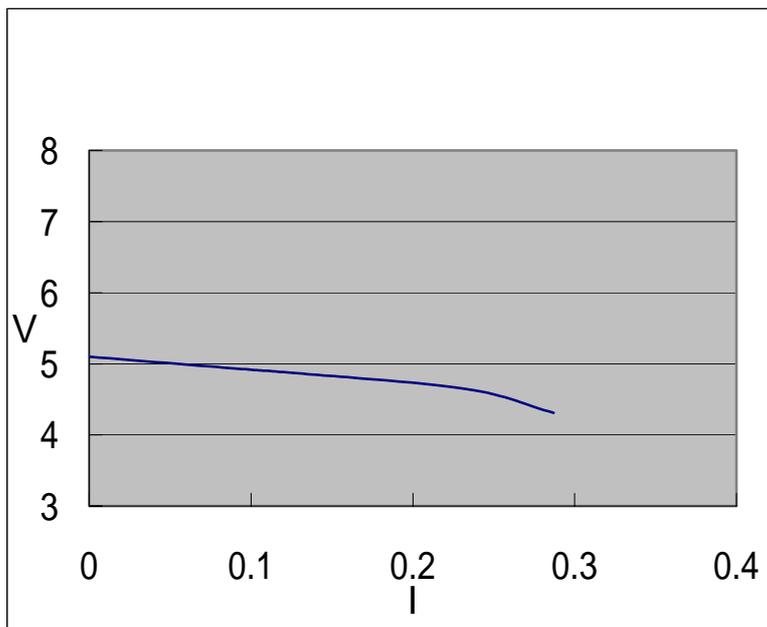


圖 4 輸入 110 V 時之 5V 輸出端的負載測試

圖 5 所示為輸入電壓為交流 220 V，在 15 伏特直流輸出端執行負載測試的輸出電壓-電流之關係圖。其負載電阻分別為：開路、50、40、20、15 歐姆電阻，而相對應的輸出端電壓則分別為：15.06 V、15.01 V、15.00 V、14.95 V、14.92 V，所得到的電壓變動率分別為：0.4%、0.667%、0%、-0.33%、-0.53%。

圖 6 所示為輸入電壓為交流 220 V，在 5 伏特直流輸出端執行負載測試的輸出電壓-電流之關係圖。其負載電阻分別為：開路、50、40、20、15 歐姆電阻，而相對應的輸出端電壓則分別為：

5.08 V、4.83 V、4.77 V、4.55 V、4.42 V，所得到的電壓變動率分別為：1.6%、-3.4%、-4.6%、-9%、-11.6%。

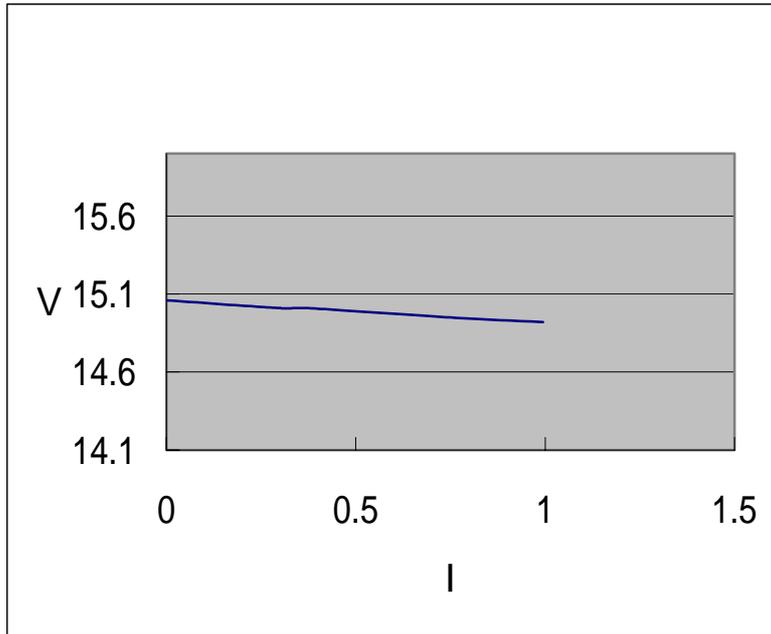


圖 5 輸入 220 V 時之 15V 輸出端的負載測試

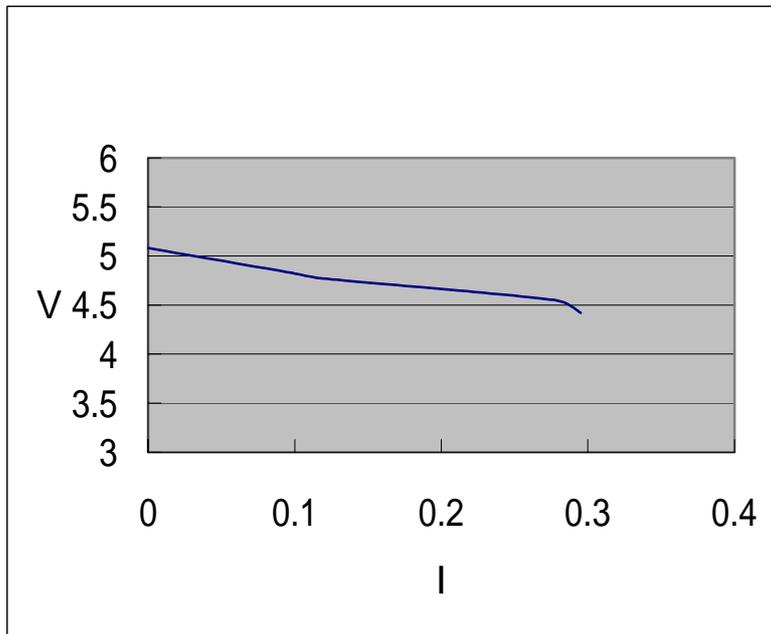


圖 6 輸入 220 V 時之 5V 輸出端的負載測試

圖 7 所示為輸入電壓為交流 110 伏特，在 15V 輸出端測試過電流保護電路的功能，將輸出電流限制在 1 安培，其負載電阻分別設定為：無載、1~15、50、40、20 歐姆時的輸出端電壓-電流關係圖。可得知當負載電流超越 1A 時，輸出端電壓會急劇下降以充分發揮本電路的過電流保護功能。

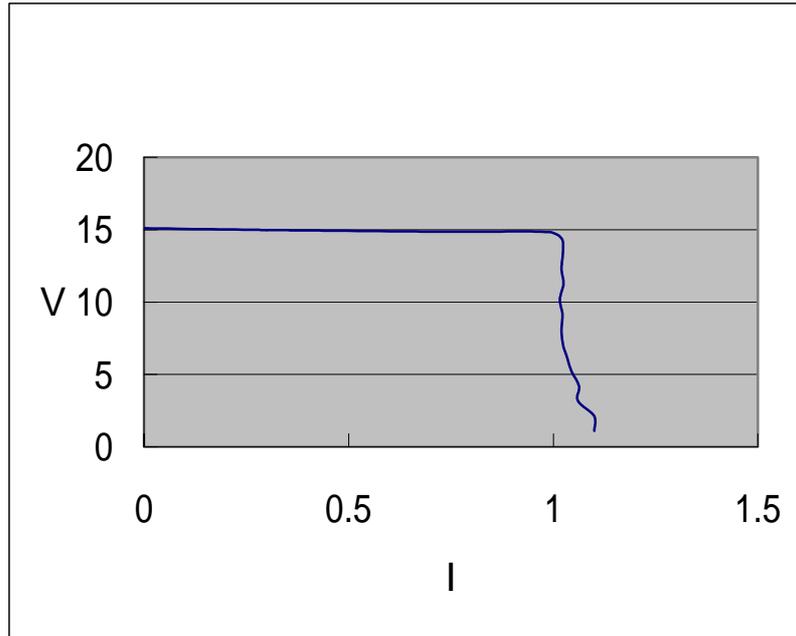


圖 7 輸入 110 V 時之 15V 輸出端的過電流保護功能測試

圖 8、圖 9、圖 10 所示分別為 MOSFET 功率開關 TOP202 在無載、10 負載、滿載時的汲-源極之間波形，得知加載可讓 TOP202 的汲-源極之間切換波形變成方波。

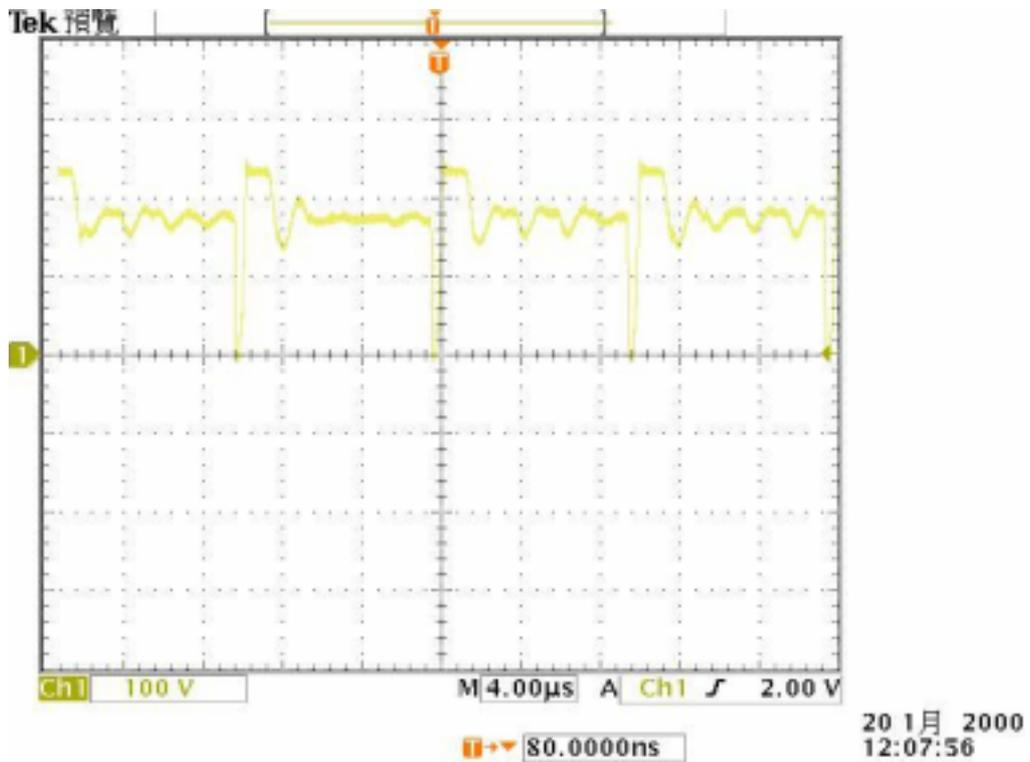


圖 8 TOP202 在無載時的汲-源極之間波形

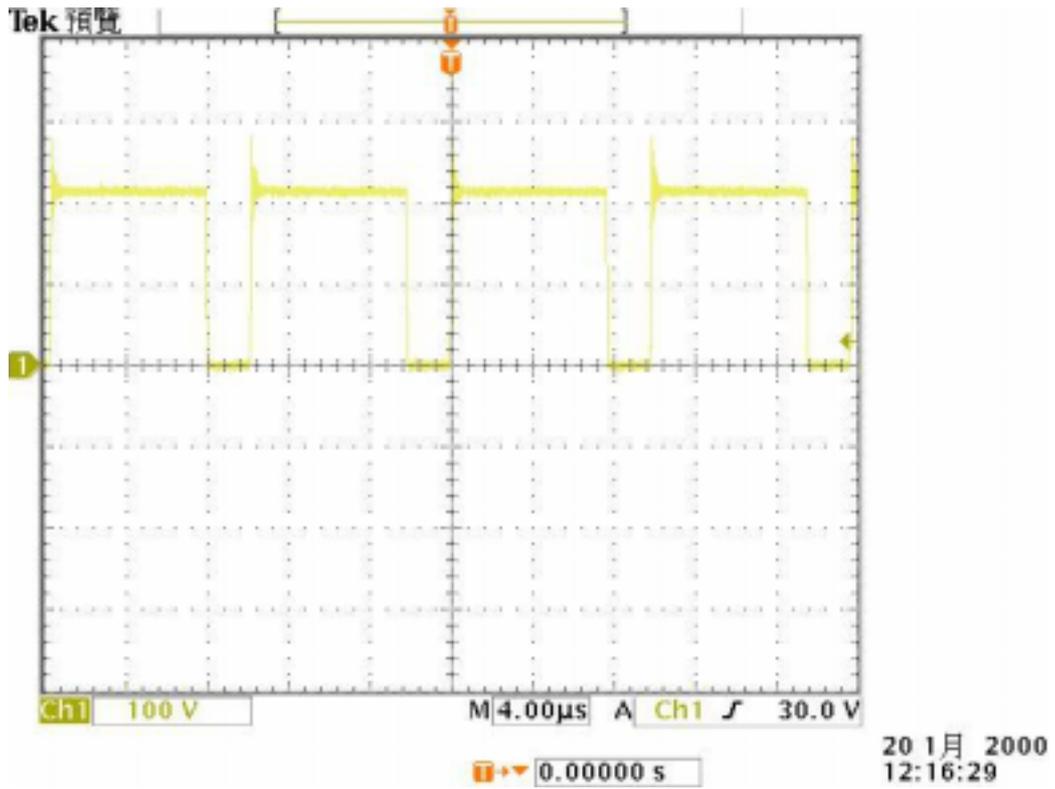


圖 9 TOP202 在 10% 負載時的汲-源極之間波形

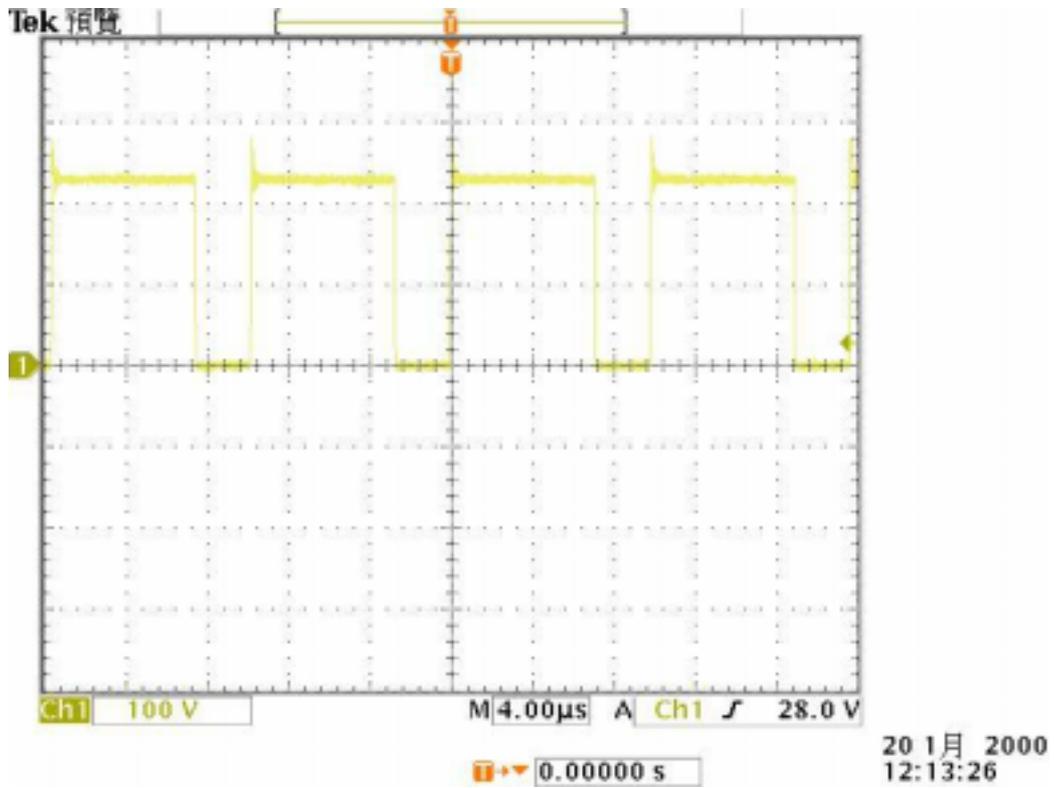


圖 10 TOP202 在滿載時的汲-源極之間波形

15V 輸出端在無載、10 負載、滿載時的輸出電壓波形則分別如圖 11、圖 12、圖 13 所示，得知加載可獲得較佳的切換波形，且在切換瞬間會產生震盪刺波。

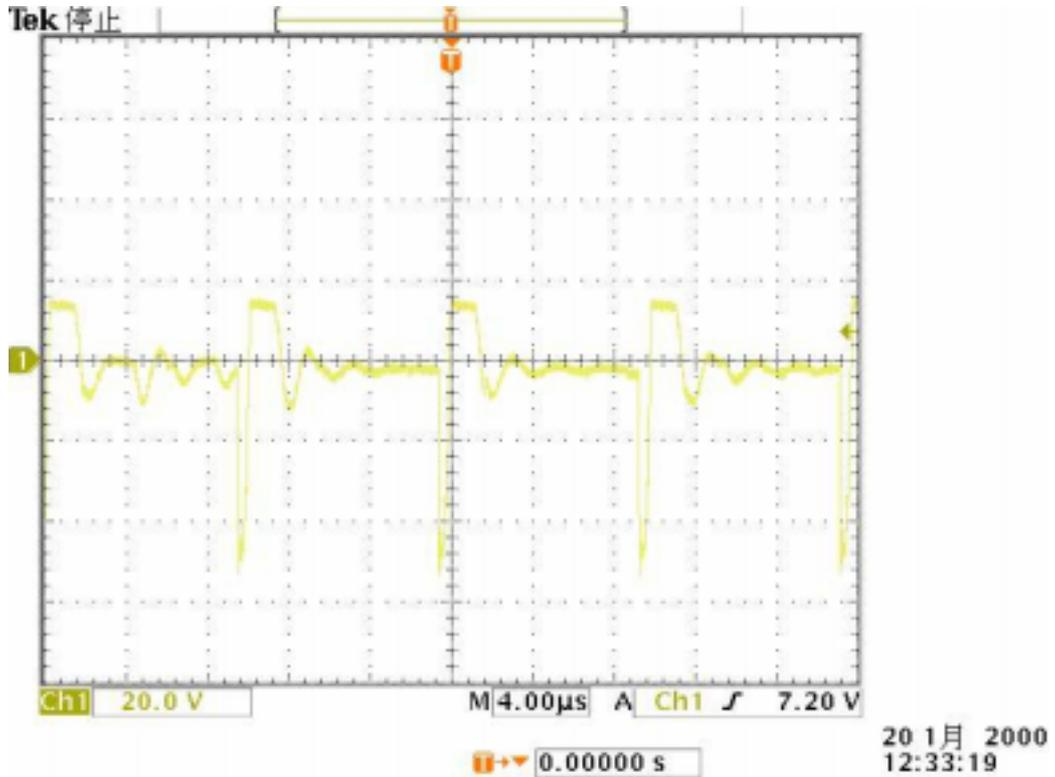


圖 11 15V 輸出端在無載時的輸出電壓波形

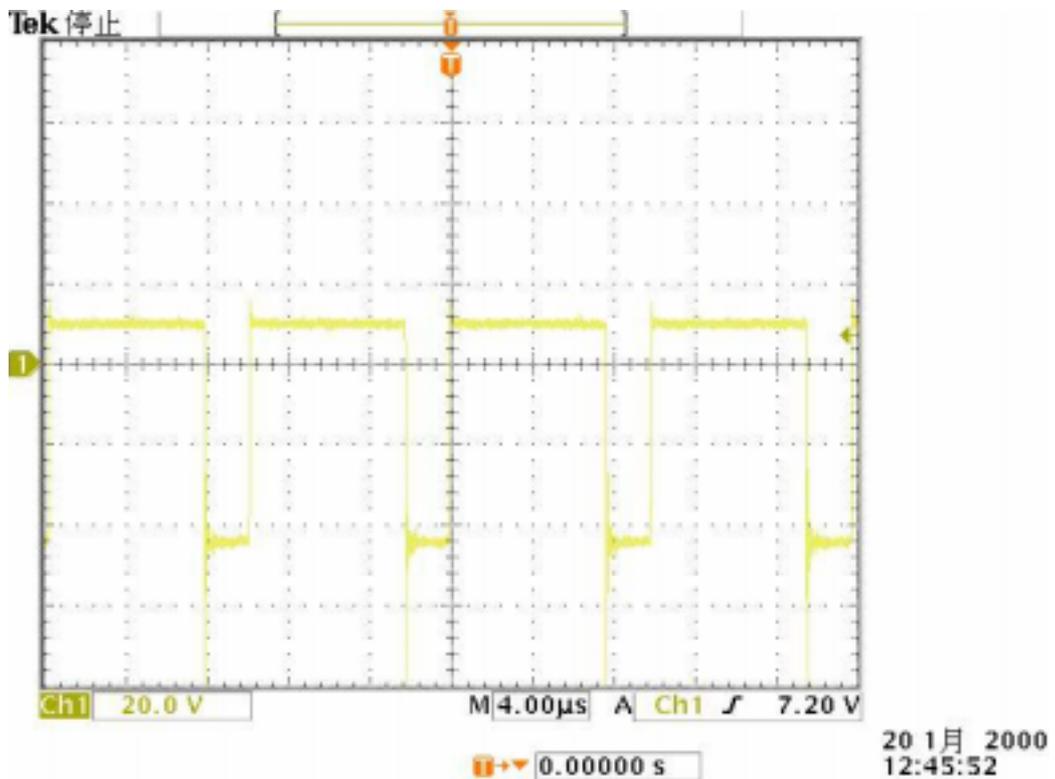


圖 12 15V 輸出端在 10 負載時的輸出電壓波形

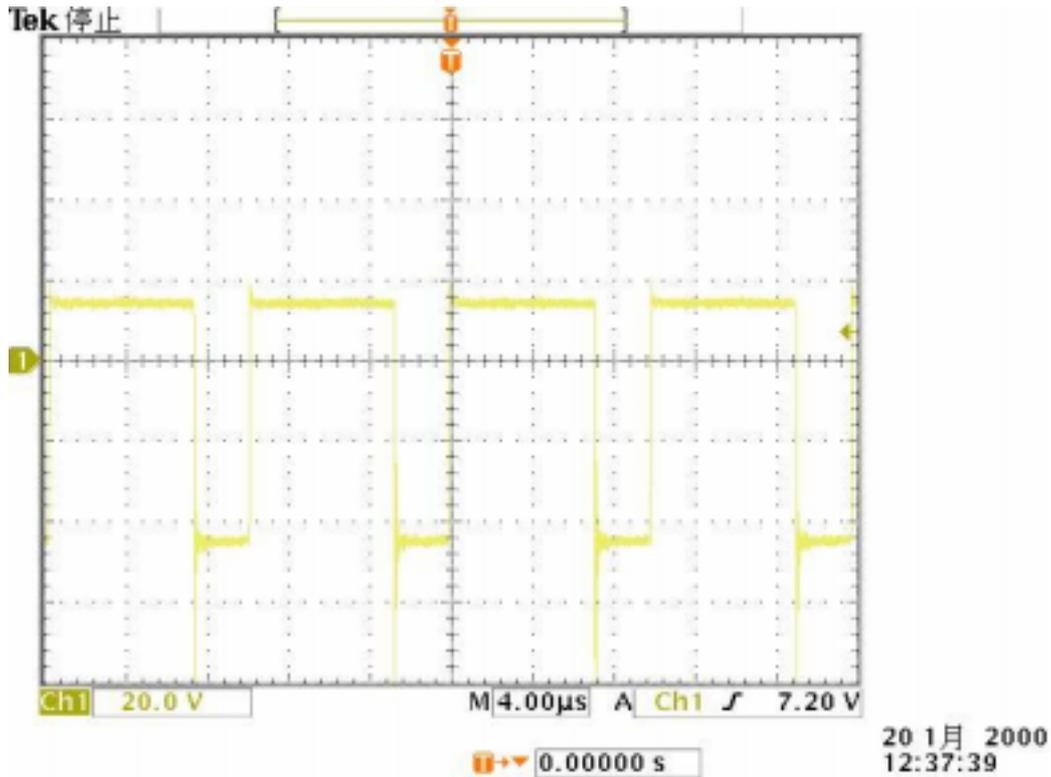


圖 13 15V 輸出端在滿載時的輸出電壓波形

4. 結論

切換式電源供應器的高效率特性，使其在電腦、週邊終端裝置、通信機器乃至於民生用機器等被廣泛的應用，再者由於元件製造技術的進步以及控制技術的不斷研發，也使得切換式電源供應器除了追求輕、薄、短、小目標之外，更往高容量與更高切換速率方向發展。

設計符合顧客條件需求之切換式電源供應器乃是商業產品生產的宗旨，故市面上很多切換式電源供應器之產品往往以不斷測試經驗的累積來設計，以達到既可合乎世界各國所制訂之安全規格標準，又可以供應客戶條件需求下之理想產品。對於一般研究設計者而言，困難點就是目前市面上的設計參考資料或書籍極少，以致於無法獲得較廣泛且深入的研究，而造成無法精確適當的取用電路元件規格。

在電路實作方面，對於元件的特性與各參數的認識是非常重要的，因為那是直接影響成品功能的好壞，因此必須選擇適當的元件，才能得到正確的實驗結果。

5. 參考文獻

- [1] 鄭振東編譯，「轉換式電源穩定器設計要訣」，建興出版社，修訂版，民國八十二年九月。
- [2] 梁適安，「交換式電源供應器之理論與實務設計」，全華科技圖書公司，第二版，民國八十四年四月。
- [3] David Kung, “Data Book And Design Guide,” Applications Engineering, July 16,1996, Sunnyvale, California.

