

電子電路系統設計

Power Supply

目錄

I. Introduction:	3
• 負載調節率 (Load Regulation)	3
• 線性調整率 (Line Regulation).....	4
• 常見的穩壓器類型	4
II. Power supply block diagram + Circuit in IC (Schematic):	5
A. Power supply block diagram	5
B. Circuit in IC (Schematic).....	5
III. Specifications:	6
A. 半波整流電路	6
B. 降壓型轉換器晶片選用與原理推導	6
a. 型態一開關導通	6
b. 型態二開關不導通	7
C. 主要元件設計	8
IV. Simulation:	10
V. Implementation + Measurement Setup / Procedure:	11
A. 儀器介紹	11
B. 量測流程圖	11
VI. Measurement Results + Discussion:	12
A. 輸出訊號量測	12
B. Line Regulation	12
C. Load Regulation.....	13
D. Ripple Rejection Ratio.....	14
E. Discussion	15
VII. Conclusion:	16
VIII. 參考資料:	16

I. Introduction:

穩壓器（Voltage Regulator）是一種電子裝置，主要功能是將電壓保持在穩定的水平。在電力系統和電子裝置中，電壓的穩定性對許多電子元件的正確運作很重要，因為穩壓器可以被用來確保輸出電壓在一定範圍內，不受輸入電壓波動的影響。一個穩壓器可能是簡單的前饋設計或者可能包含負反饋控制迴路。而根據不同的設計，穩壓器可以分為直流穩壓和交流穩壓。

穩壓器可以在電源變化或是負載電流變化時，提供恆定的電壓，也常在電源供應系統中使用，與整流器、電子濾波器等配合工作，提供穩定輸出的電壓，例如微處理器和其他元件所需的工作電壓。在一個分布式配電系統中，穩壓器可能會安裝在一個子電站或者沿著導線延伸的方向上，以保證用戶無論功率高低都能得到穩定的電壓。

穩壓器的作用包含以下四點：

- 1.穩定電壓： 穩壓器可校正變動的輸入電壓，確保輸出電壓維持穩定。
- 2.保護電子設備： 穩壓器能夠防止因電壓變動而損壞或影響電子設備的正常運作。它可以提供一個穩定的電源，減少對設備的損害。
- 3.過壓保護： 一些穩壓器還具有過壓保護功能，能夠阻止過高的電壓進入系統，從而保護與之相連的設備免受損壞。
- 4.節能： 穩壓器可以調整輸出電壓，使其維持在一個最佳水平，這有助於節能和延長設備的壽命。

然而穩壓器的輸出電壓只是近似定值，仍會有一些變動。穩壓器的性能可以用以下二種量測值表示，

• 負載調節率（Load Regulation）

又稱負載效應，是指輸出電壓隨負載變化的波動，條件是輸入為額定電壓。電源負載的變化會引起電源輸出的變化，負載增加輸出降低，相反負載減少輸出升高。負載調節率通常以百分比或毫伏表示，表示輸出電壓的變化與負載變化之間的關係，在不同負載條件下，穩壓器輸出電壓的變化程度。好的電源負載變化引起的輸出變化減到最低，通常指標為 3%~5%。

一般會希望負載調節率越低越好，特別是對於一些對電壓穩定性要求較高的應用，例如精密儀器、通信設備等。一些高品質的穩壓器能夠提供較低的負載調節率，確保在不同工作條件下提供穩定的電源。

• 線性調整率 (Line Regulation)

面對輸入電壓變化時，電源或穩壓器能夠維持輸出電壓穩定的能力，也可以說是可以評估電源對輸入電壓變化的敏感度，較低的線性調整率意味著輸出電壓較不受輸入電壓變化的影響，這對一些對輸出電壓穩定性要求較高的應用非常重要，特別是在使用線性穩壓器的場合。線性調整率是選擇電源或穩壓器時重要的性能指標之一，因為它直接影響到設備在不同輸入電壓條件下的穩定性。

• 常見的穩壓器類型

1. 線性穩壓器(LDO)：

工作原理：線性穩壓器使用線性元件（二極管和晶體管）來調節電壓。當輸入電壓發生變化時，控制元件調整通過它的電流，以維持輸出電壓的穩定。

優點：簡單、容易實現、低輸出電壓漣波。

缺點：較低的效率、不適用於大功率應用。

2. 開關穩壓器：

工作原理：開關穩壓器使用開關元件週期性的開啟和關閉，調節輸出電壓。當輸入電壓變化時，開關穩壓器能夠迅速調整開關元件的狀態，以保持穩定的輸出電壓。

優點：較高的效率、適用於大功率應用、輸出電壓可調節。

缺點：複雜的電路、可能有較大的輸出電壓漣波。

3. 切換穩壓器：

工作原理：切換穩壓器是一種結合了線性和開關穩壓器的設計。使用一個切換器來調節電壓，然後再使用線性元件進一步穩定輸出電壓。

優點：高效率、相對低的輸出電壓漣波。

缺點：比線性穩壓器複雜，但效率較高。

4. 開環和閉環穩壓器：

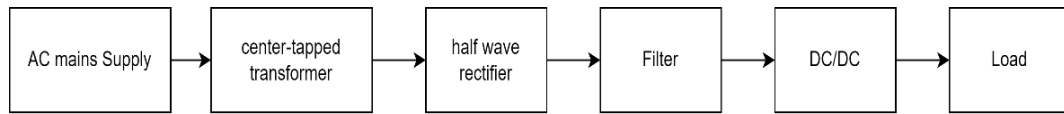
工作原理：開環穩壓器沒有迴授，而閉環穩壓器包含迴授。閉環穩壓器通常更為精確，能夠根據輸出電壓的變化調整輸入。

優點：閉環穩壓器通常具有較高的精度和穩定性。

缺點：複雜度較高，成本可能較高。

II. Power supply block diagram + Circuit in IC (Schematic):

A. Power supply block diagram



B. Circuit in IC (Schematic)

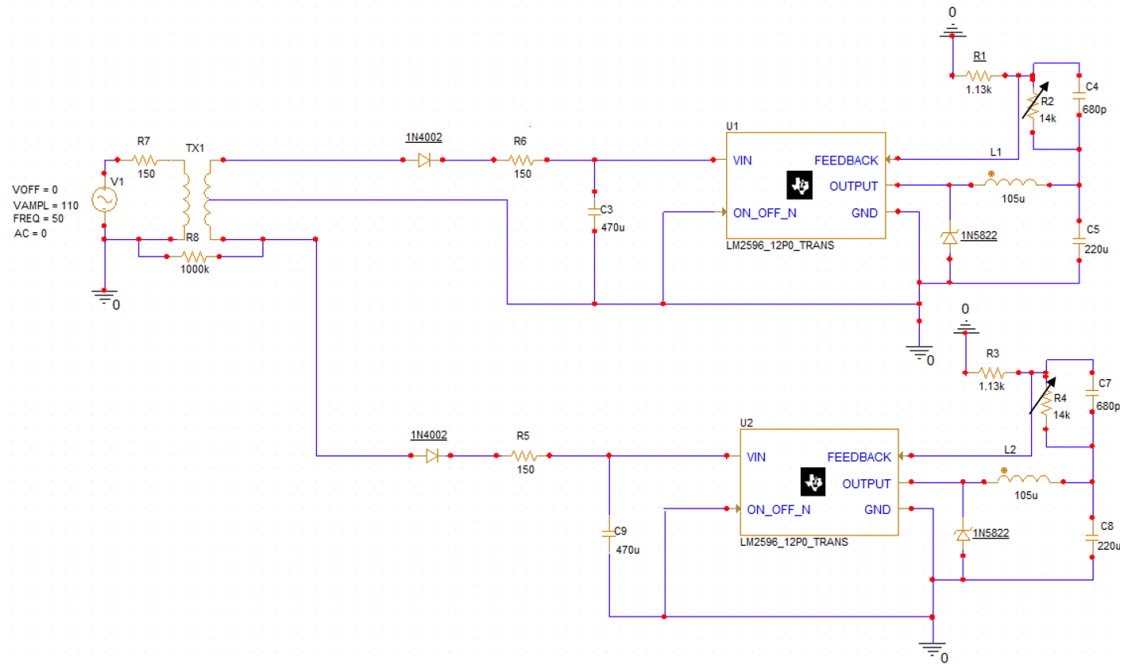


Fig. 2. Power supply schematic

在一開始的時候，我們採用的是中央抽頭的變壓器，其目的為我們需要一個正端的輸入以及一個負端的輸入的波型，這樣才能分別接到半波整流器及兩個 Buck Converter，使其輸出一個正的及一個負的，給後端儀表放大器的 OP Amplifier (V+、V-)。

在半波整流器後端開始我們使用的是降壓型轉換器，因為降壓型轉換器比起線性穩壓器更加的有效率，而在此我們也設定了電感、電容、Schottky diode 其目的為使電感電流可以回流才不會形成脈衝電壓，再來會使用 Schottky diode 的原因為在低頻時，整流二極體很容易在順向或逆向電壓，形成開、關狀態，但當頻率增加時，一般二極體在逆向時已不能快速的截止，這表示一般二極體在高頻時，因其在逆向週期的起始時間，仍維持關閉狀態，不能有整流的效能，此外電感 L 和電容 C 也分別有作為傳送與儲能以及濾除交流雜訊的功用，使 power supply 能夠更加穩定，Performance 也能夠更好。

III. Specifications:

A. 半波整流電路

本次前端整流電路是使用 1N4002 二極體所組成的，由於我們後端穩壓電路是使用降壓型轉換器，通常這類切換式電源的效率以及其他整體表現都不會太差，甚至優點高於線性穩壓器，所以考量到整體電路的使用面積以及成本規劃，故使用半波整流電路做為前端整流處理。

B. 降壓型轉換器晶片選用與原理推導

電路效率是一個相當重要的指標，效率高低將影響整個電路的工作效率。降壓型轉換器通常效率較高，因為它們僅在開關元件導通和不導通時消耗能量，在高輸入與低輸出電壓差的情況下，效率特別顯著，而線性穩壓器效率較低，特別是當輸入與輸出電壓差很大時，這是因為所有多餘的電壓都被轉換為熱。故本次實驗選用 LM2596 降壓型轉換器做為穩壓的部分，其主要特徵如下表 Table.1 所示

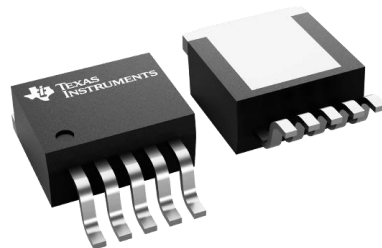


Fig. 3. LM2596

輸入電壓	最高 45 V
輸出電壓範圍	1.2 V~37 V
輸出負載電流	3 A
開關頻率	150 kHz

Table. 1

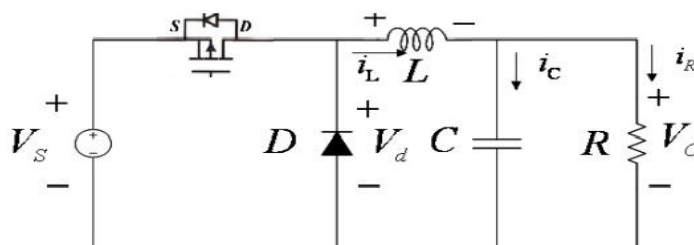


Fig. 4. 降壓型轉換器原理電路圖

a. 型態一開關導通

由 Fig.4 所示，當 $0 \leq t \leq DT$ 時，PMOS 電晶體 ON，輸入電源對電感元件儲能，對電容元件充電，因此電流呈直線上升，所以二極體 D 為逆向偏壓，此時為二極體 D 開路狀態。其中 Duty 為責任比，是在一

個周期內工作時間與總時間的比值。

可表示為下式：

$$\text{Duty} = \frac{t}{T} \quad (1)$$

其中 t 為導通時間， T 為周期。

故可知此時電感電壓為：

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} = V_S - V_O$$

經推導可得開關導通電感電流為：

$$\begin{aligned} \Delta i_L(\text{on}) &= i_L(DT) - i_L(0) \\ &= \frac{(V_S - V_O)DT}{L} - 0 \\ &= \frac{(V_S - V_O)DT}{L} \end{aligned} \quad (2)$$

b. 型態二開關不導通

由 Fig.4 所示，當 $DT \leq t \leq T$ 時，PMOS 電晶體 OFF，儲存電感能量會被釋放出來，電感電流呈直線方式遞減，電感電壓的極性會順勢反轉（電感由被動元件變成主動元件），此時對二極體而言，電壓為順向導通。當沒有二極體時，儲存於電感上的能量無法釋放，會造成很大的脈衝電壓，使得電路上的元件會遭受破壞。

故可知此時電感電壓為：

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} = -V_O$$

經推導可得開關不導通電感電流為：

$$\begin{aligned} \Delta i_L(\text{off}) &= i_L(T) - i_L(DT) \\ &= \frac{-(V_O T - V_S DT)}{L} - \frac{(V_S - V_O)DT}{L} \\ &= \frac{-V_O T}{L} (1 - D) \end{aligned} \quad (3)$$

c. 一個完整開關周期的電感電流為 $\Delta i_L(\text{on}) + \Delta i_L(\text{off})$ ，由(2)、(3)式可以整理為下式：

$$\begin{aligned} \frac{(V_S - V_O)DT}{L} - \frac{V_O T}{L} (1 - D) &= 0 \\ \Rightarrow V_O &= V_S D \\ \Rightarrow \frac{V_O}{V_S} &= D \end{aligned} \quad (4)$$

當 D 小於 1 時，稱為降壓型轉換器。

C.主要元件設計

a.電感

- 由(4)可知當輸入 15 V 時，輸出 5 V 可計算出 Duty 為 0.333。
- LM2596 降壓型轉換器的開關頻率由 Data sheet 可知為 150 kHz，當負載為 10 Ω 帶入下式：

$$L_{\min} = \frac{(1-D)R}{2f}$$

可得 L_{\min} 為 83.75 μH 。

電感值約等於 $L_{\min} \times 125\%$ ，故 $L=104.68 \mu\text{H}$ 。

b.電容

1.輸入電容(Fig.3 C3、C9):

經過整流器後要進入穩壓器輸入前的電容，我們希望輸入漣波可以小，且必須可以承受所產生的漣波電流，故選用 470 μF -50 V 的電容。

2.輸出電容(Fig.3 C5、C8):

在電路中由 LC 組成的低通濾波器，其主要功能是濾除電路中交流雜訊，可以減少漣波產生，使得輸出電壓更為穩定。

- 輸出電壓的漣波，可藉由電容、電壓與電流之間的關係求得。

電容電流為：

$$i_C = i_L - i_R$$

- 由電容定義中可導出：

$$Q = C V_o$$

$$\Rightarrow \Delta Q = C \Delta V_o$$

$$\Rightarrow \Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} \quad (5)$$

- 充電變化 ΔQ 可表示為：

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \left(\frac{T}{2} \right) \left(\frac{\Delta i_L}{2} \right) = \frac{T \Delta i_L}{8} \quad (6)$$

- 透過(5).(6)整理可得：

$$C = \frac{1-D}{8L \left(\frac{\Delta V_o}{V_o} \right)^2 f^2} \quad (7)$$

透過(7)式可知，較大的電容可以使漣波較小，故最後選定 220 μF -35 V。

3.在回授電阻(Fig.3 R2、R4)並連電容，在此區域並連一顆電容，可以為回授電路增加 Lead compensation，並且還增加 Phase margin，從而可以獲得更好的迴路穩定性。此電容值參考 Data sheet 為 680 pF。

c.二極體

本次實驗選用 1N5822 Schottky Diode，Schottky Diode 具有以下優點：

1.提升效率：

Schottky Diode 的正向壓降較低，意味著在導通狀態下的功率損耗較小。因此，使用 Schottky Diode 的降壓轉換器在能量轉換過程中能達到更高的效率。

2. 快速響應：

Schottky Diode 的開關速度快，使得降壓轉換器能夠更快地響應負載變化，對於需要快速動態響應的應用特別重要。

3. 適用於高頻操作：

由於 Schottky Diode 可以在高頻下有效工作，它們使得降壓轉換器可以在更高的開關頻率下運行。這有助於縮小轉換器中使用的電感器和電容器的體積，從而減小整個轉換器的尺寸。

4. 降低熱損耗：

較低的導通損耗減少了轉換器在運行時的熱輸出，減輕了散熱要求，並提高了整體系統的可靠性。

5. 改善輕載效率：

在輕載條件下，Schottky Diode 的低壓降有助於保持較高的效率，這對於需要在不同負載條件下運行的應用尤為重要。

d.電阻

由 LM2596 晶片的 Data sheet 可知下式

$$V_{out} = V_{ref} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \text{ 其中 } V_{ref}=1.23 \text{ V}$$

所以我們令 R_1 為 $1 \text{ k}\Omega$ ， R_2 為可調式電阻，透過調整 R_2 電阻的方式來使得輸出電壓為 5 V 。

e.下表 Table.2 為 Fig.2 元件表

Buck Converter	LM2596
R1	1.13 k Ω
R2	2~20 k Ω
C3	470 uF
C4	680 pF
C5	220 uF
L1	104.68 uH
D1	1N4002
D2	1N4002
D3	1N5822
D4	1N5822

Table. 2

IV. Simulation:

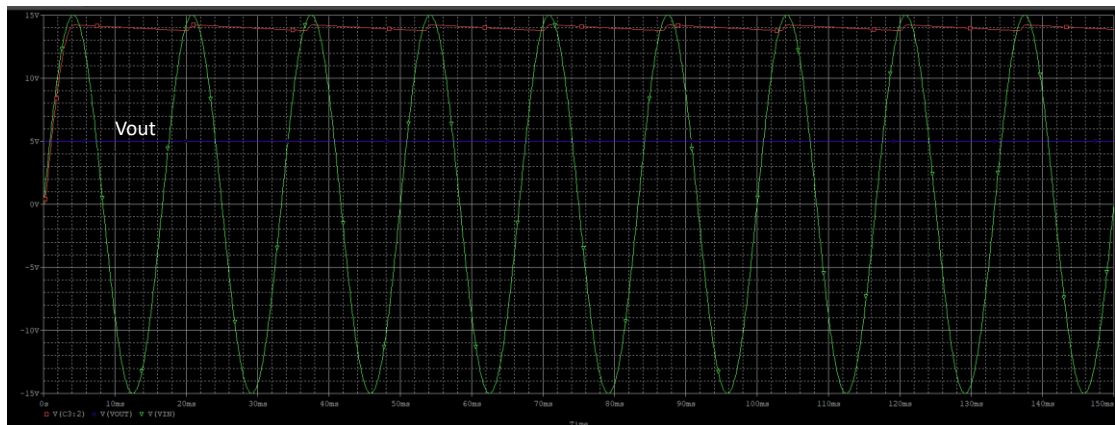


Fig. 5.輸出波形圖

Fig. 5.綠色的波形為經過半波整流器後的波形，紅色的濾波為電容導致的波形，藍色的線為輸出定電壓(Vout)。

以上 Fig. 5.模擬圖為我們使用中央抽頭的變壓器，且分別接到了半波整流器及兩個 Buck Converter 的圖形，由模擬圖可知，經過半波整流器後所呈現的波形很穩定，其振幅值均維持在 15 V，又因為我們設計的電容值較大，故電容濾漣波的效果也相當的不錯，漣波的峰到峰值都有明顯降低的趨勢，最後我們也用了降壓型轉換器 (Buck Converter)，也成功的把振幅為 15 V 的波形降到了 5V，也就是模擬圖上輸出電壓(Vout)維持定電壓的 5 V。

V. Implementation + Measurement Setup / Procedure:

A. 儀器介紹

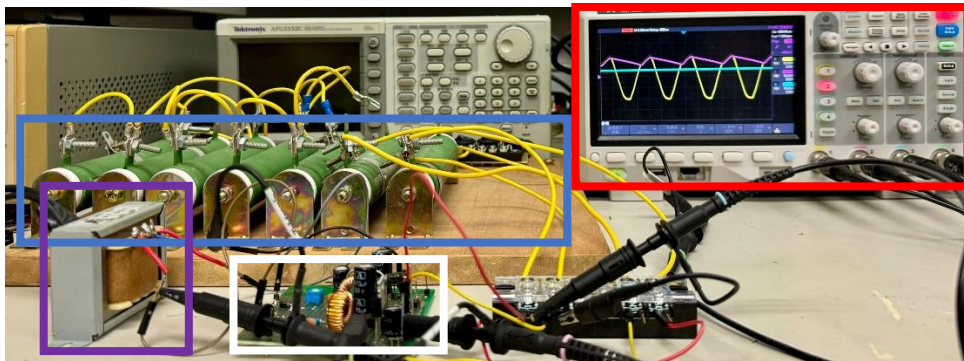
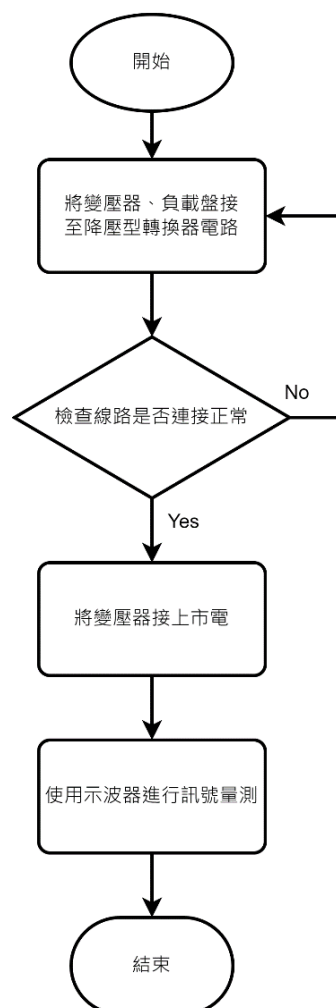


Fig.6. Measurement setup

Fig.6.藍色框為負載盤，紅色框為 Teledyne 公司生產的示波器，紫色框為中心抽頭變壓器，白色框為降壓型轉換器電路

B. 量測流程圖



VI. Measurement Results + Discussion:

A. 輸出訊號量測

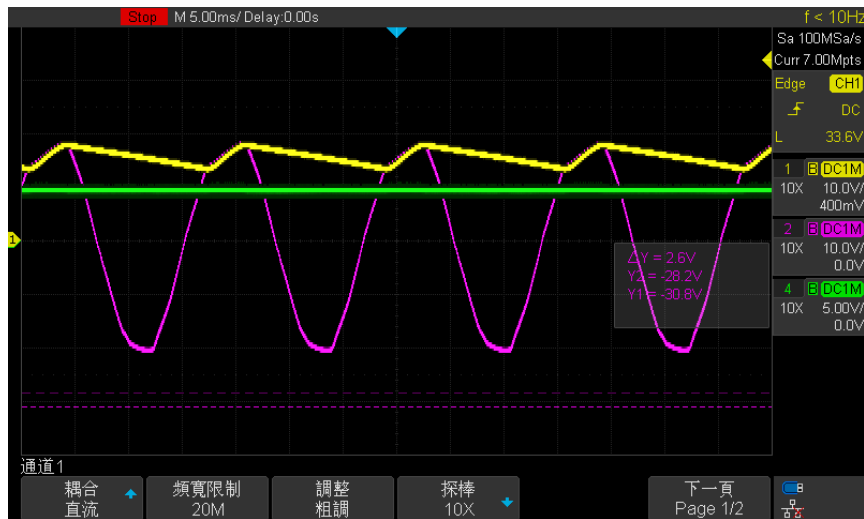


Fig.7. Output signal measurement result

B. Line Regulation

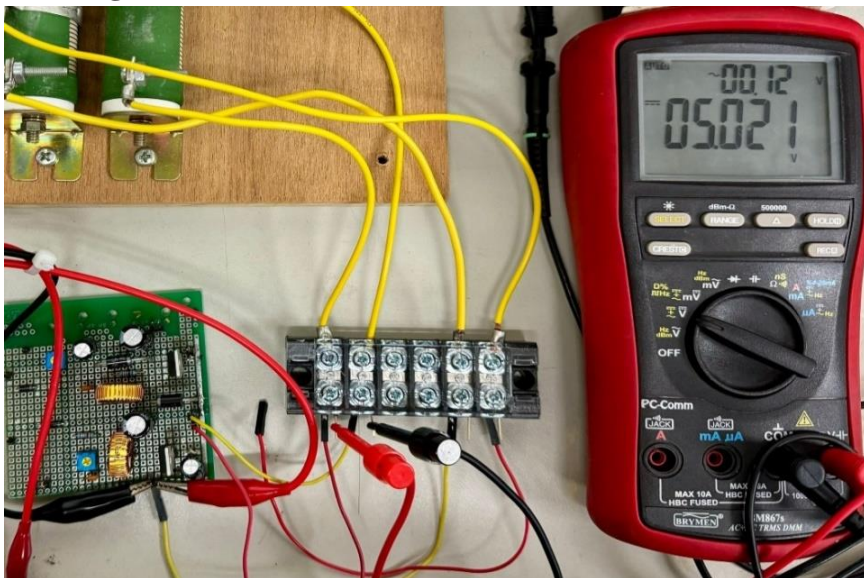


Fig.8. Line regulation by $V_{out}(\min)$

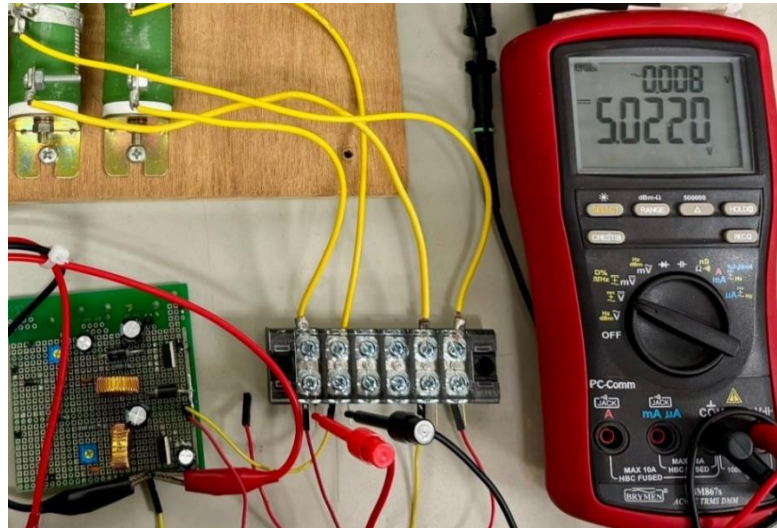


Fig.9. Line regulation by Vout(max)

由定義可知：

$$\text{Line regulation} = \frac{\left(\frac{V_{out2} - V_{out1}}{V_{out(nor)}} \right)}{V_{in2} - V_{in1}} \times 100\%$$

其中 Vnor：輸出電壓理想值

Vin₁ : 15V

Vin₂ : 15.01V

Vout₁: 當輸入電壓為 Vin₁ 時，所對應的輸出電壓.

Vout₂: 當輸入電壓為 Vin₂ 時，所對應的輸出電壓.

負載值: 50 Ω

故由電表圖及公式可知 Line regulation = $\frac{\left(\frac{5.022 - 5.021}{5} \right)}{15.01 - 15} \times 100\% = 2\%$

C. Load Regulation

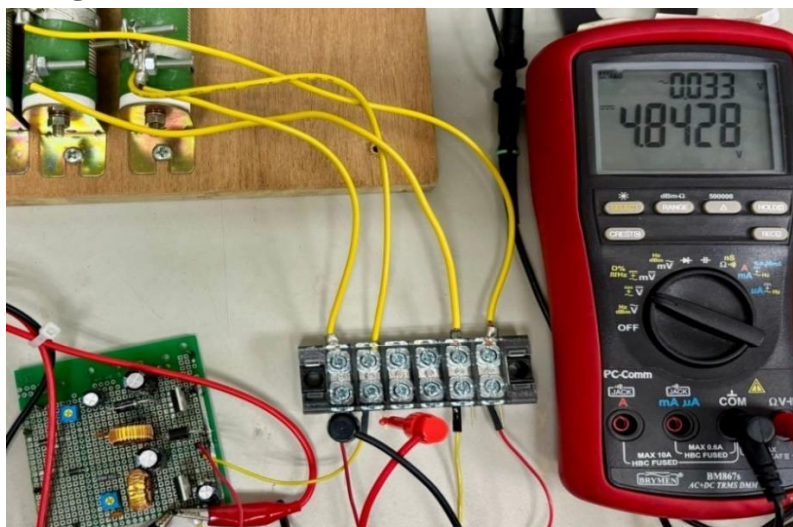


Fig.10. Load regulation by Vout (full load)

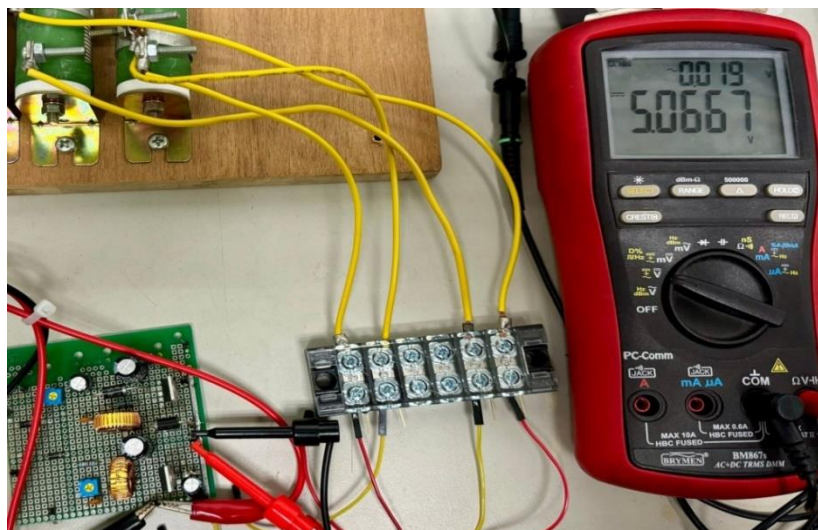


Fig.11. Load regulation by Vout (not load)

由定義可知：

$$\text{Load regulation} = \frac{V_{\text{out(not load)}} - V_{\text{out(full load)}}}{V_{\text{out(full load)}}} \times 100\%$$

其中 $V_{\text{out(not load)}}$: 無負載時之輸出電壓

$V_{\text{out(full load)}}$: 滿載時之輸出電壓

負載值: 10Ω

故由電表圖及公式可知 $\text{Load regulation} = \frac{5.0667 - 4.8428}{4.8428} \times 100\% = 4.6\%$

D. Ripple Rejection Ratio

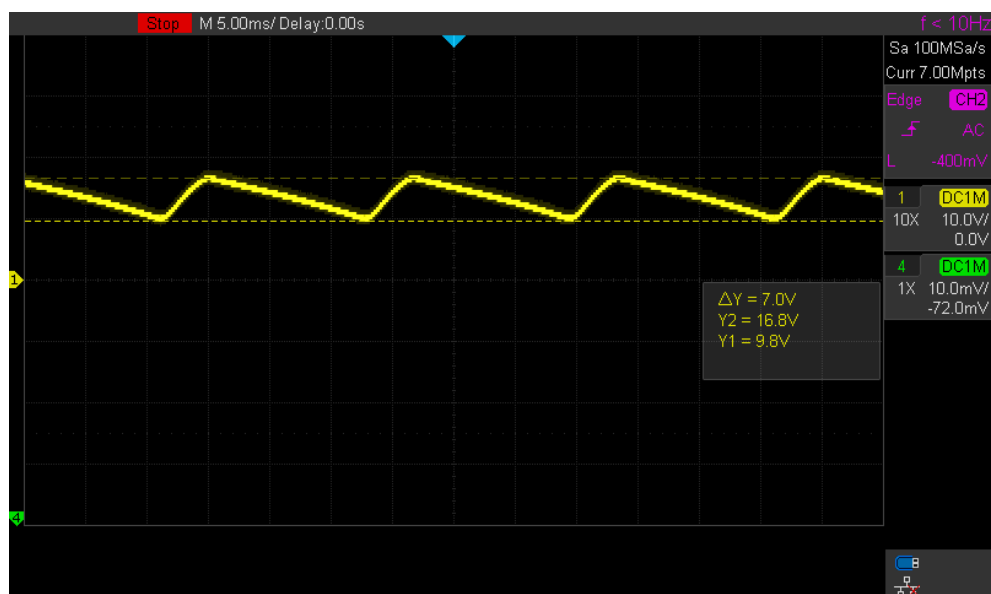


Fig.12. Input Ripple (V_{ri})

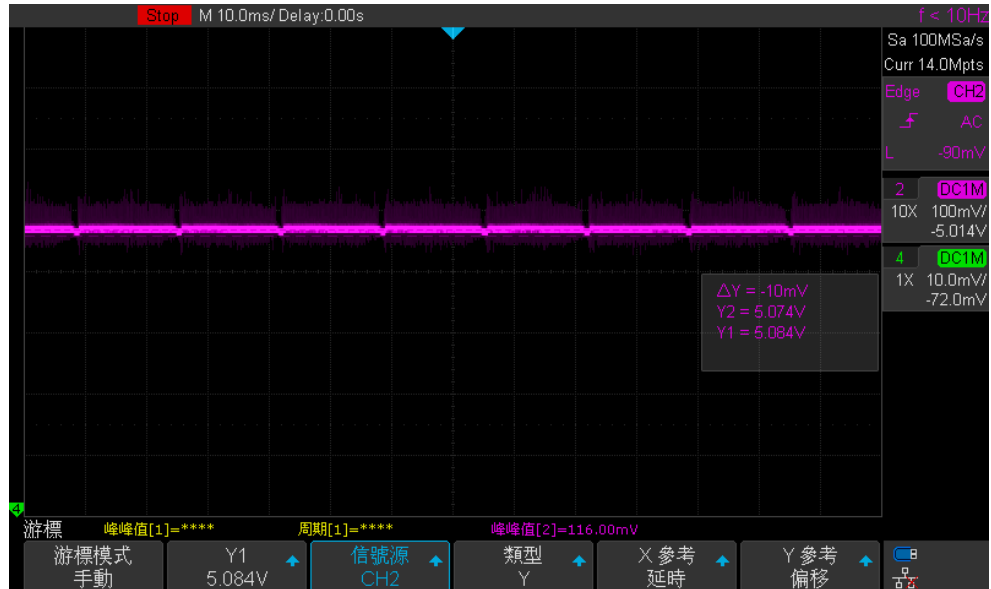


Fig.13. Output Ripple (Vro)

由定義可知：

$$\text{Ripple Rejection ratio (RRR)} = 20 \times \log_{10} \frac{V_{ri}}{V_{ro}}$$

$$\text{故由電表圖及公式可知 } \text{RRR} = 20 \times \log_{10} \frac{7}{0.01} = 57\text{dB}$$

E. Discussion

在得出來 Line Regulation 為 0.2% 時，可以發現其值相當小，所以也表示降壓型轉換器在面對輸入電壓變化時能夠更好地維持穩定的輸出電壓，且波的浮動也非常小。

在得出來 Load Regulation 為 4.6% 時可知道，在負載變化時，輸出電壓會在理想值的 $\pm 4.6\%$ 範圍內波動，其值還在容許範圍內，但比起線性穩壓器已經是好上許多。

由上述公式可得 Ripple Rejection ratio (RRR) 約為 57dB，可以發現其值相當大，由此可見此降壓型轉換器對漣波的抵抗能力相當好。

線性穩壓器在高負載時，它需要消耗更多的功率，產生較多的熱量，而降壓型轉換器是通過快速的開關下，以控制能量的流動，這種轉換方式的效率很高，因此降壓型轉換器在相同條件下通常會產生較少的熱量，故其 Temperature Coefficient 跟 Power consumption 通常比線性穩壓器低。

使用自製 Power supply 供給直流電壓給 OPA，CMRR 會提升嗎？其實需要考慮以下幾個部分：

1. 穩定性和雜訊：

自製電源的品質對於放大器的性能至關重要，一個高品質、低雜訊、穩定輸出的電源能夠提供更穩定的工作條件，從而可能提高運算放大器

的性能，包括 CMRR，相反，如果電源穩定性差或雜訊高，則可能降低放大器的性能。

2. 電源抑制比 (PSRR) :

運算放大器的電源抑制比 (PSRR) 是另一個重要參數。PSRR 高的放大器對電源波動的敏感度較低。因此，即使電源質量不是最優化，放大器也能保持較好的性能。

3. 電路設計:

自製電源的設計和實施品質也非常關鍵。包括選擇合適的元件，像穩壓器、濾波電容...等，以及實際的電路布局，都會對最終性能產生影響。

4. 特定應用需求:

某些應用可能對電源的特定特性有特殊要求，例如極低的漣波或特定的輸出電壓範圍。在這種情況下，定制的電源可能會提供比標準電源更好的性能。

因為這次實驗我們選用降壓型轉換器當作後端 DC/DC 的部分，雖然輸出電壓穩定且漣波較線性穩壓器來的小，整體效率較線性穩壓器來的高，但是畢竟降壓型轉換器主要是透過開關切換來運作的，多多少少會有開關雜訊的產生，這些優缺點其實都必須納入供給給 OPA 當作電源的考量，總結來說這是一個 tradeoff 的問題，還是需要考慮整體的部分，但是如果能夠設計出一個品質好、穩定且低雜訊電源供應器，對於 OPA 的 CMRR 多少都會有提升的效果。

VII. Conclusion:

在本次實驗中選擇元件是非常重要的一環，尤其在切換式電源中，元件的匹配性都將會影響結果，無論是對於效率、穩定性和性能，選擇元件是一個關鍵，如果元件不匹配，將可能導致轉換器效率降低、輸出電壓不穩定、晶片過熱甚至是損壞，因此我們透過理論推導以及模擬分析選擇合適的元件，並且以穩壓器指標作為評判結果的依據。

VIII. 參考資料:

- 1.<https://mcitransformer.com/about-mci/power-supply-design-notes/>
- 2.https://www.cincon.com/newsdetail_en.php?id=7659
- 3.<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/power-supply>
- 4.<https://www.analog.com/en/technical-articles/dc-to-dc-buck-converter-tutorial.html>
- 5.<https://techweb.rohm.com.tw/product/power-ic/acdc/acdc-design/3551/>
- 6.[https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2595.pdf?ts=1699889384448&ref_url=https%](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2595.pdf?ts=1699889384448&ref_url=https%3A%2F%2Fwww.ti.com%2Fproduct%2Fpower-ic%2Fdc-dc-converters%2Fbuck%2F)

253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252Fzh-tw%252FLM2595

7.<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/2819/MOTOROLA/1N5822.html>

8.<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/14619/PANJIT/1N4002.html>