

National Cheng Kung University

Institute of Space and Plasma Physics

Annual Progress Report



研究生：謝知叡

指導教授：張博宇 博士

中華民國一〇八年一月一日

## 摘要

為了研究火星弓形震波，必須使用脈衝功率系統產生電漿噴流，而產生電漿噴流用的圓柱形導線陣列，要用 Rogowski coil 量測其電流，本次報告將介紹 Rogowski coil 的製作與校正方法。再者，目前啟動圓柱形導線陣列電流的軌道間隙開關已經製作完成，但觸發軌道間隙開關的 Marx generator 還須製作與分析，本次報告將介紹使用 Pspice 模擬 Marx generator 電路的分析方法。最後，軌道間隙開關 還需進行測試，本次報告附上軌道間隙開關的崩潰電壓資料與解讀。

# 目錄

一、目標	3
二、脈衝功率系統	4
三、Rogowski coil	7
(一) 構造	7
(二) 製作方式	7
(三) 量測公式	9
(四) 周遭環境測試	11
(五) 量測 Rogowski Coil 之輸入電流 $I_{in}$ 與輸出電壓 $V_{out}$ 的相位關係圖	12
(六) 資料分析	14
(七) 利用波形產生器得到的實驗值與理論值的分析	17
結論	19
四、Marx Generator 的輸出模擬	20
(一) Marx generator	20
(二) 模擬建置-時控 Spark Gap Switch 元件	22
(三) 模擬建置-一階 Marx Generator	24
(四) 模擬建置-三階半真實 Marx Generator	25
(五) 另一個類似的辦法-Transmission Line Transformer	錯誤! 尚未定義書籤。
(六) 結論	27
五、軌道間隙開關崩潰電壓測試	28
六、總結	30
附錄一	31
Rogowski coil 實驗資料	31

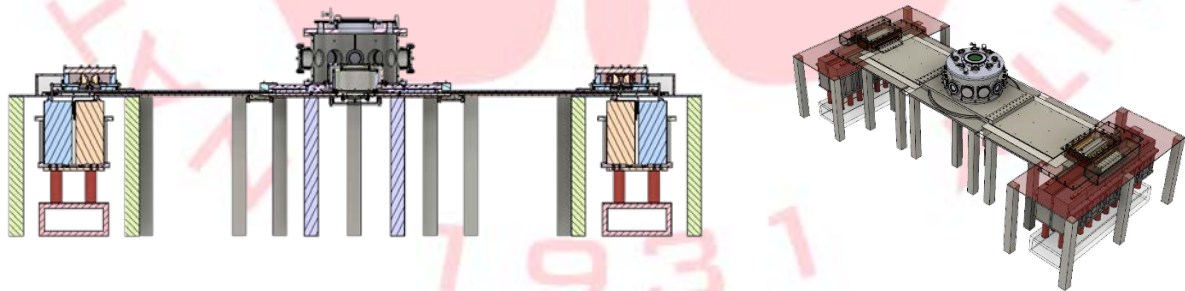
## 一、目標

- 碩士論文將於 2019 年暑假至 2020 年暑假之間完成，  
題目為“製作火星弓形震波在實驗室中的模型”，達成的步驟如下：
  - 2019 年初至 2019 年暑假：製作出打出電漿噴流的脈衝功率系統
  - 2019 年暑假至 2019 年底：製作出量測電漿噴流的光學系統
  - 2019 年底至 2020 年暑假：緩衝時間
- 目前已完成的項目(本次報告內容):
  - 製作 Rogowski coil
  - 模擬 Marx generator
- 其他
  - 量測軌道間隙開關的崩潰電壓
  - 將資料轉換成圖檔的程式

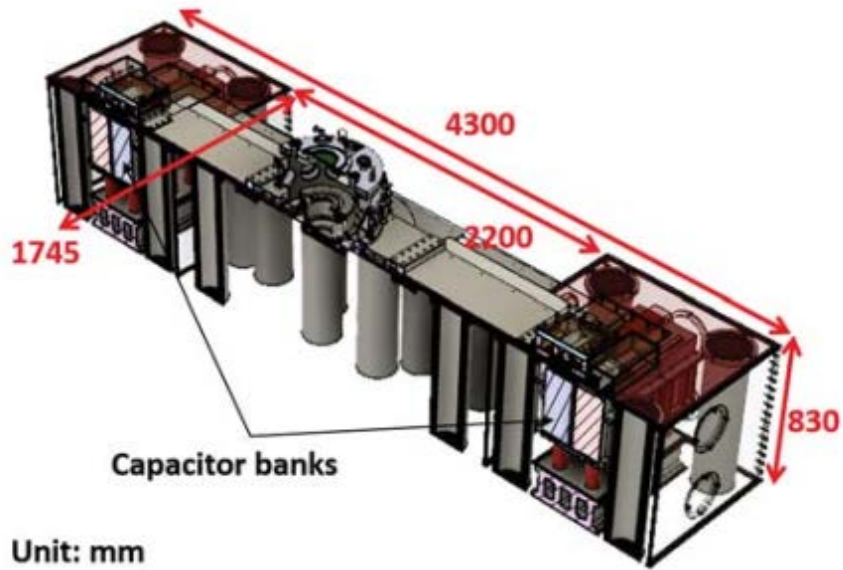
## 二、脈衝功率系統

在需要高功率輸出但只有低功率輸入的情況下，脈衝功率系統能將長時間低功率輸入的能量先儲存起來，再將其於短時間高功率輸出。例如一實驗需要使用電能約 1GW 的能量，但是電源供應器最高只能提供電能約 1kW 的能量，這時即可用脈衝功率系統將能量先儲存起來，再將能量於短時間內一次放出，即可達到 1GW 的需求。

如圖一，我們使用的脈衝功率系統由兩側的電容組與中間的真空腔組成，電容組為儲存電能之處而真空腔為釋放電能之處。圖二呈現系統的尺寸，整個系統長 4.3 公尺、寬 1.745 公尺、高 0.83 公尺，兩側電容組的間距為 2.2 公尺。表三呈現系統各項參數值，我們先測試將電容充至 20kV 放電的情形，再測試系統最大能充至的電壓 50kV 放電的情形。圖四為一側的電容組與軌道間隙開關，軌道間隙開關能控制電容放電的時機，當電容組充滿電後，由軌道間隙開關控制何時放電，再透過平行電板傳輸線將電傳到中間的真空腔進行實驗。而真空腔(如圖五)，中間有一個同軸圓柱傳輸線(如圖六)，此傳輸線是由兩層金屬圓柱組成，內層連接電容的高電壓端，外層接地，而 Rogowski coil(一種電流計)將會置於紅點標示之處，細節將於下節中介紹。



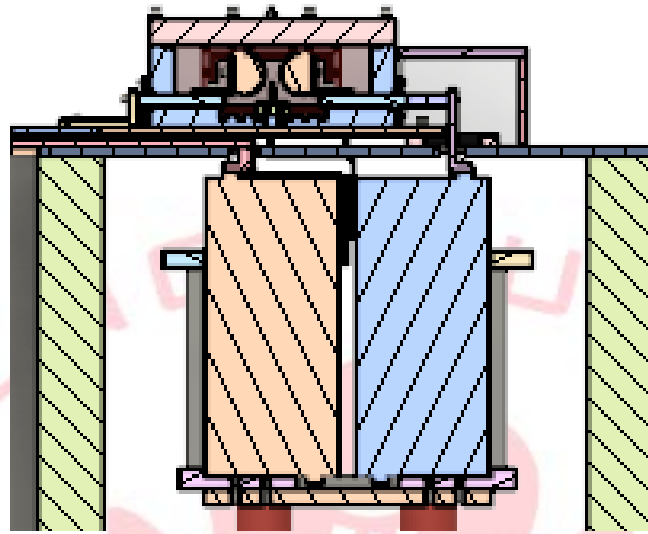
圖一：此脈衝功率系統由兩側的電容組與中間的真空腔組成。兩側的電容組先充能，再向中間的真空腔釋能



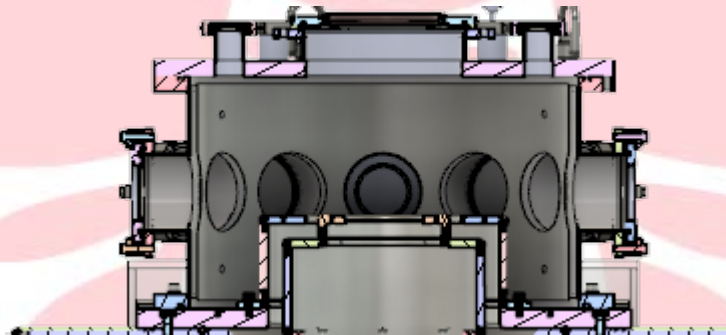
圖二：此脈衝功率系統的尺寸圖

電容組的總電容值	$5\ \mu\text{F}$
系統總電感	$50\text{nH}$
放電前的電壓	$20\text{kV}$ or $50\text{kV}$
輸出能量	$1\text{kJ}$ or $6.25\text{kJ}$
電流峰值	$\sim 200\text{kA}$ or $\sim 500\text{kA}$
電壓升壓時間	$\sim 800\text{ns}$
輸出功率	$1\text{GW}$ or $10\text{GW}$

表三：系統各項參數值。其中 or 前後分別代表電容充至  $20\text{kV}$  或  $50\text{kV}$  放電的各項參數值。



圖四：上方的軌道間隙開關及下方的電容組。軌道間隙開關控制電容組放電的時機



圖五：真空腔。其中有一金屬圓柱支架



圖六：金屬圓柱支架，紅點表示 Rogowski coil 的位置

### 三、Rogowski coil

在真空腔中進行的實驗，因其所需的電流值太大，以至於不能直接量測，故使用 Rogowski coil 感測周遭磁場的方式來間接量測。本次報告的實驗結果皆放在雲端資料夾中，參考附錄一。

#### (一) 構造

圖八呈現一同軸電纜的截面，同軸電纜由外層接地線與內層金屬芯組成，並由中層絕緣皮與外層絕緣皮保護。

如圖十，Rogowski coil 由一條帶絕緣皮的同軸電纜(內層金屬芯+中層絕緣皮)外圍纏繞螺旋細線(外圈螺旋線)組成，螺旋線一端接於內層金屬芯，另一端接於外層接地線。規格如表七：

R：Rogowski coil 半徑	150mm
r：螺旋線纏繞半徑	2.2mm
N：螺旋線纏繞圈數	50 圈

表七：Rogowski coil 規格表

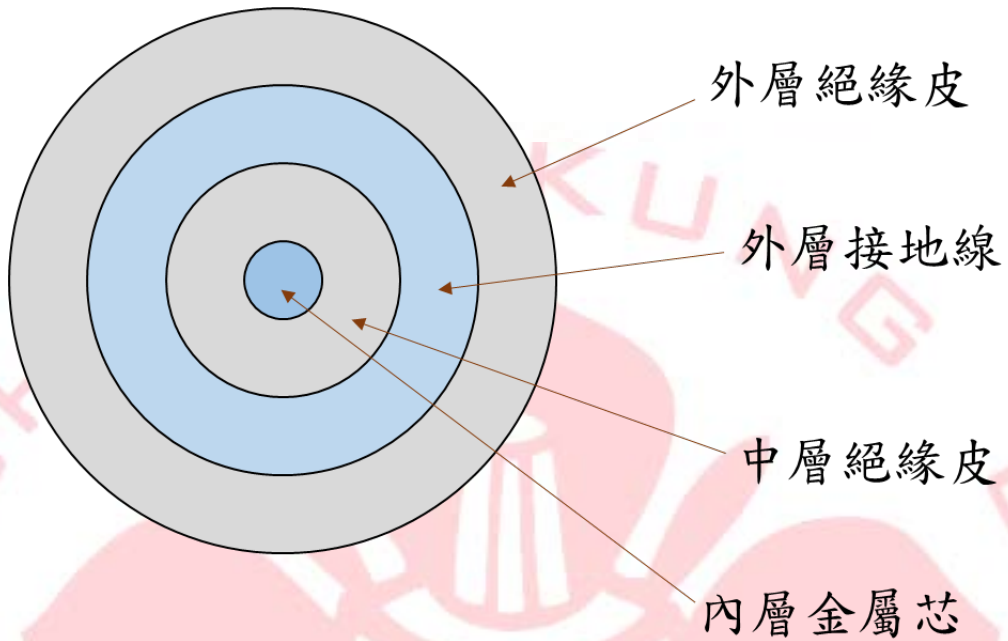
#### (二) 製作方式

我們改造一條接有 BNC 接頭的同軸電纜製成 Rogowski coil，取一條有 BNC 接頭的同軸電纜，圖八呈現其截面圖，同軸電纜由外層接地線與內層金屬芯組成，並由中層絕緣皮與外層絕緣皮保護，參考圖九並根據下述步驟製作：

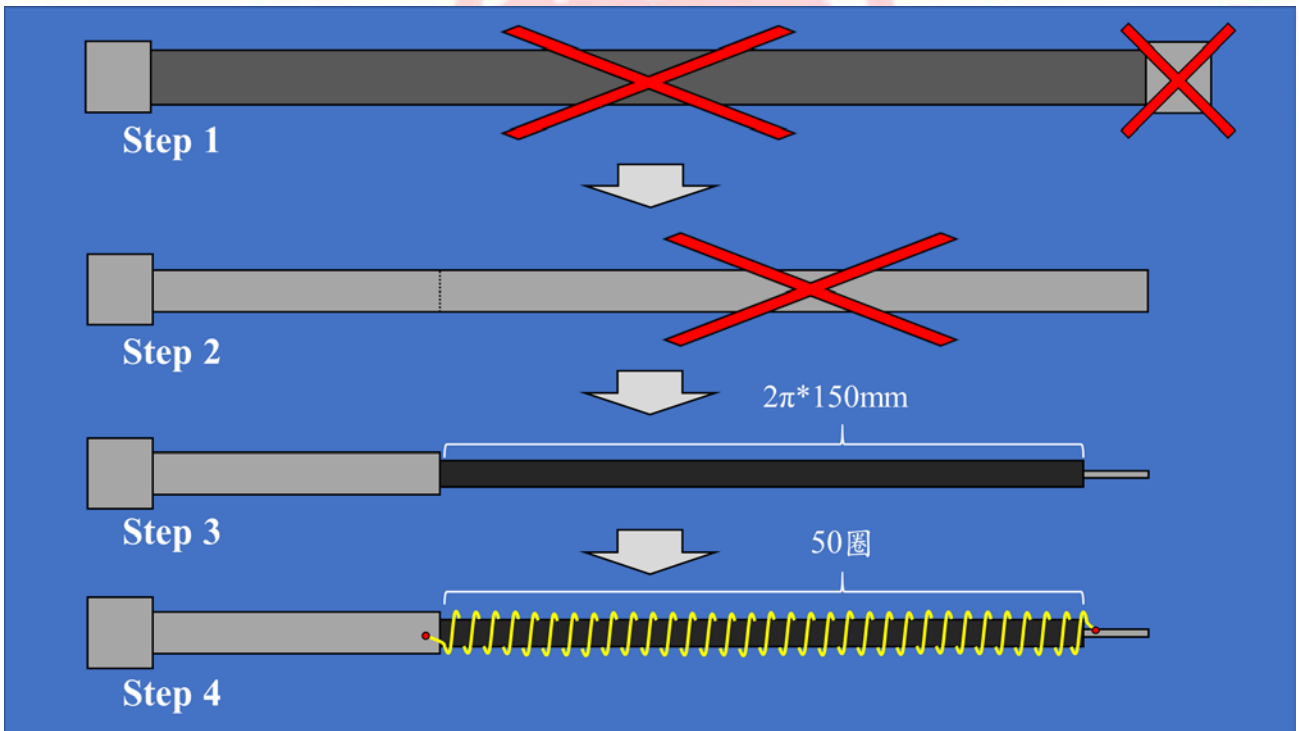
- Step 1. 將一頭 BNC 接頭剪斷，並去除所有外層絕緣皮。
- Step 2. 再去除前半段的外層接地線約  $2\pi R + 50\text{mm} \approx 1000\text{mm}$ 。
- Step 3. 將中層絕緣皮去除約  $< 50\text{mm}$ ，露出內層金屬芯。
- Step 4. 取另一條細電線作外層螺旋線，一端焊在內層金屬芯上，均勻纏繞 50 圈後(每圈長約  $950\text{mm}/50 \text{ 圈} \approx 19\text{mm}$ )，另一端焊在之前



預留的外層接地線上，焊點如圖九 Step 4 中的紅點。



圖八：Rogowski coil 由內至外的結構依序為內層金屬芯、中層絕緣皮、外圈螺旋線與外層接地線、外層絕緣皮



圖九：Rogowski coil 製作流程

### (三) 量測公式

如圖十，量測時，將 BNC 接頭直接接上示波器即可，其量測電壓符合下列公式：

$$V_{\text{out}} = M_{\text{Rogowski coil}} * \frac{dI_{\text{in}}}{dt},$$

$$M_{\text{Rogowski coil}} = -\frac{r^2 N \mu_0}{2R},$$

其中  $V_{\text{out}}$  為量測電壓， $I_{\text{in}}$  為通過 Rogowski Coil 中間的電流， $r$  為纏繞螺旋線的半徑， $N$  為其圈數， $R$  為 Rogowski Coil 大圓的半徑。

推導過程如下：

如圖十，Rogowski coil 的半徑為  $R$ ，上纏繞的外圈螺旋線共  $N$  圈，此線纏繞之半徑為  $r$ ，Rogowski coil 輸出訊號為  $V_{\text{out}}$ ，通過 Rogowski coil 中的輸入電流為  $I_{\text{in}}$ ，此電流產生的磁場為  $B$ 。

磁場  $B$  與電流  $I_{\text{in}}$  有此關係：

$$B = \frac{\mu_0 I_{\text{in}}}{2\pi R} \quad (\text{eq.1})$$

根據法拉第定律，螺旋線一圈能感應出的電壓為：

$$-\frac{d}{dt}(B * \pi r^2) \quad (\text{eq.2})$$

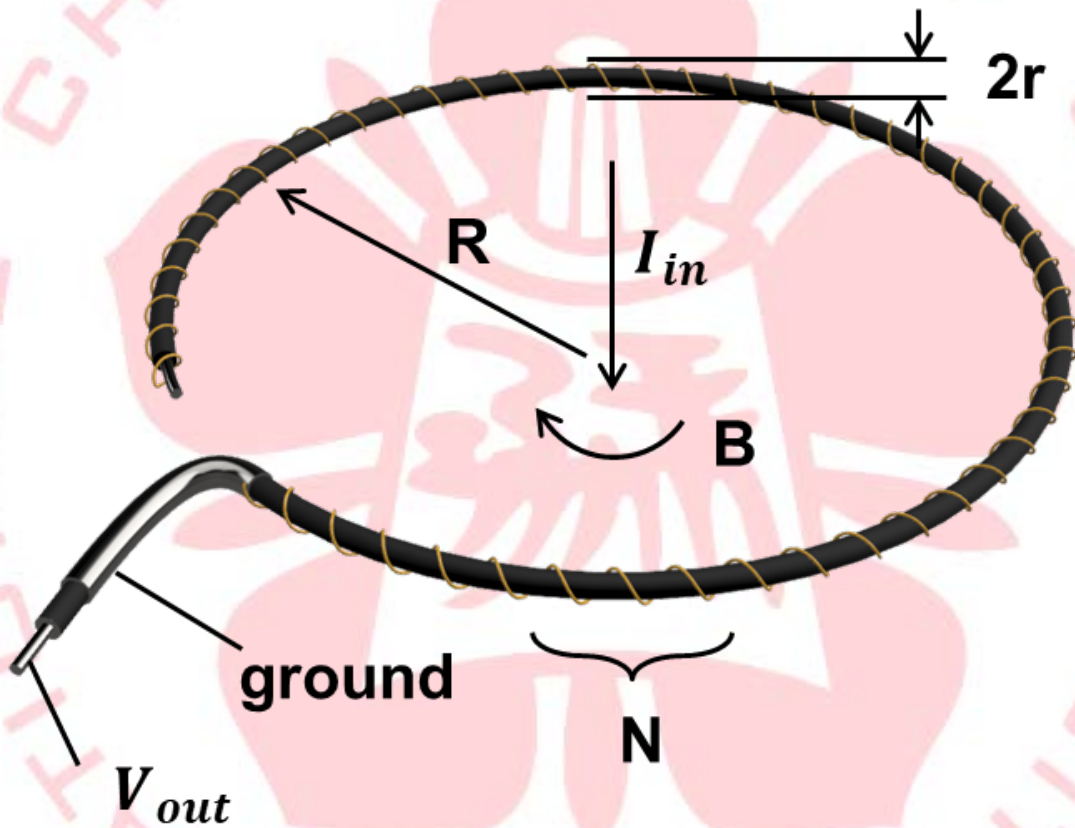
共  $N$  圈，故輸出電壓  $V_{\text{out}}$  為 (eq.2)\* $N$ ：

$$V_{\text{out}} = N * \left(-\frac{d}{dt}(B * \pi r^2)\right) \quad (\text{eq.3})$$

將(eq.1)代入(eq.3)：

$$V_{out} = -\frac{r^2 N \mu_0}{2R} \frac{dI_{in}}{dt} = M_{\text{Rogowski coil}} * \frac{dI_{in}}{dt} \quad (\text{eq.4})$$

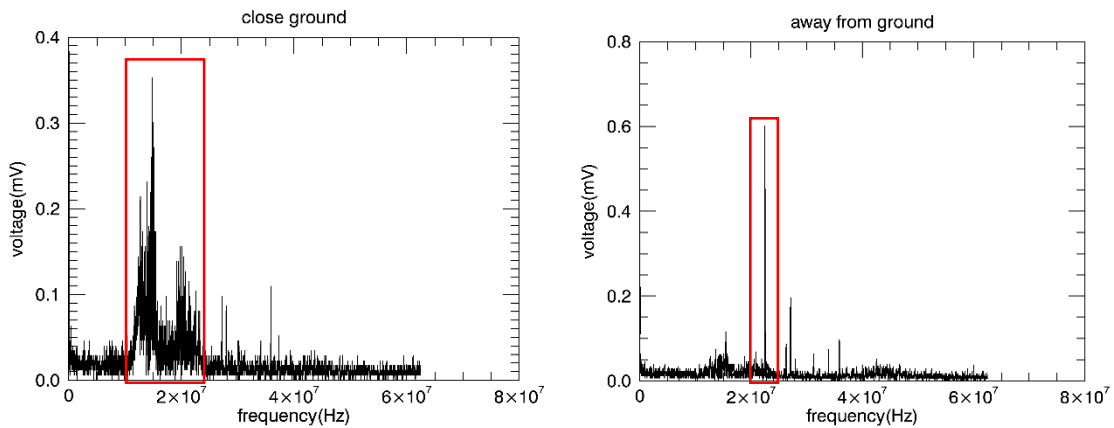
此處  $M_{\text{Rogowski coil}} = -\frac{r^2 N \mu_0}{2R}$  為 Rogowski coil 的互感



圖十：Rogowski coil 推導參數圖

#### (四) 周遭環境測試

Rogowski Coil 會量到環境中的雜訊，圖十一中如紅框所示可看見靠近地面時會量測到雜訊( $\sim 18\text{MHz}\sim 25\text{MHz}$ )，遠離地面時也會量測到另一種雜訊( $\sim 23\text{MHz}$ )，當我們要使用 Rogowski Coil 時，須遠離  $10\text{MHz}$  以上的頻率區域。參考雲端資料夾 \1. surroundings\_pretest。



圖十一：Rogowski coil 量測到環境中的雜訊

### (五) 量測 Rogowski Coil 之輸入電流 $I_{in}$ 與輸出電壓 $V_{out}$ 的相位關係圖

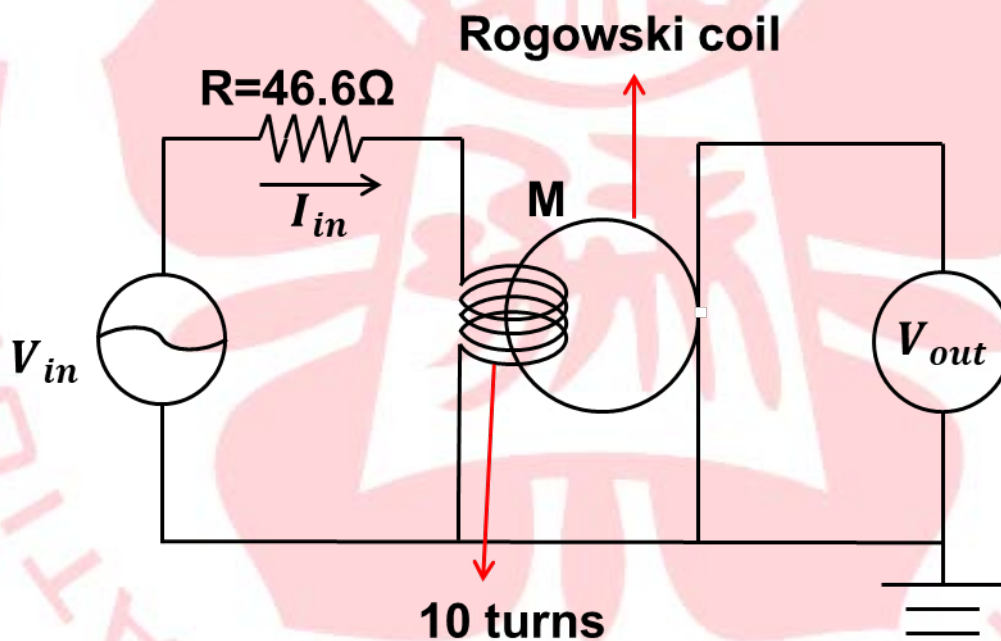
如圖十二所示，將訊號產生器輸出的電壓( $V_{in} = I_{in}R$ )通過一電阻( $R$ )後纏繞 10 圈，再將 Rogowski Coil 繞過線圈量測通過之電流大小。見圖十三，圖中之 $V_{in} = I_{in}R$ ，根據(eq.4)可得：

$$V_{out} \propto -\frac{dI_{in}}{dt},$$

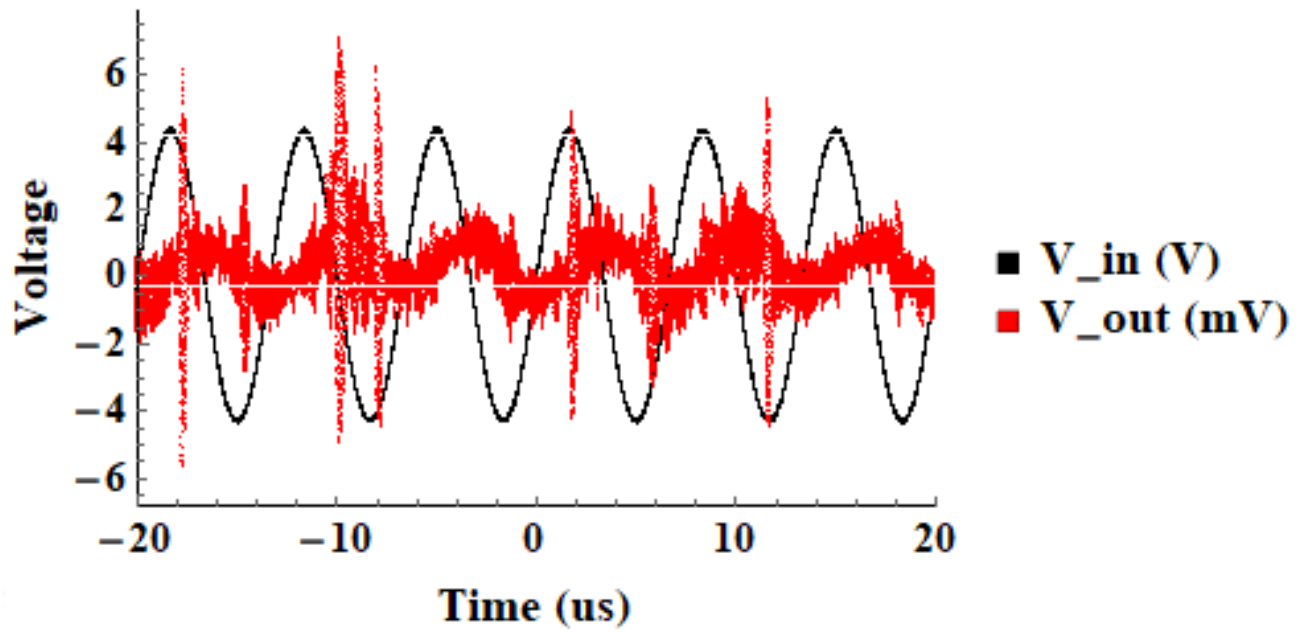
$I_{in}$ 與 $V_{out}$ 的相位差為 $\frac{1}{4}\pi$ ，可知其相位差與理論相符。

量測結果參考雲端資料夾\3. ~\5.

input\_and\_output\_voltage\_in\_phase\_diagram\_change\_frequency。



圖十二：測試 Rogowski coil 架設圖



圖十三：Rogowski coil 輸入端與輸出端的相位測試結果



## (六) 資料分析

參考雲端資料夾 6.~9.，將上述之訊號做傅立葉轉換，調整訊號產生器的頻率與震幅，可得其主要頻率的震幅。

如圖十四，若輸入電流( $I_{in}$ )的位置與中心點有一段距離( $d$ )，而輸入電流( $I_{in}$ )產生的磁場在 Rogowski coil 上的總磁通量( $\phi$  或  $\phi$ )與距離( $d$ )的關係，利用程式計算電流產生的磁場對 Rogowski coil 的每個位置做積分，計算時用到的參數如圖十五，其中  $\alpha$  為 Rogowski coil 其中之一位置相對於原點與計算起始點的角度， $l$  為  $I_{in}$  至此位置的距離， $\theta$  為  $R$  與  $l$  的角度，公式如下：

$$\int V_{out} dt \propto \phi = \int_0^{2\pi} \frac{\mu_0 I}{2\pi l} * \cos\theta * \pi r^2 * \frac{N}{2\pi} * d\alpha$$

其中  $\int V_{out} dt \propto \phi$  項是由 eq.3 導出

$$V_{out} = N * \left( -\frac{d}{dt} (B * \pi r^2) \right) = -N \frac{d}{dt} \phi \rightarrow \int V_{out} dt \propto \phi ,$$

$\frac{\mu_0 I}{2\pi l}$  項為磁場  $B$ 、 $\pi r^2$  項為一圈外層螺旋線(coil)的面積、 $\frac{N}{2\pi}$  項為外層螺旋線圈數的角密度，另外  $\cos\theta$  與  $\alpha$  的關係由餘弦公式：

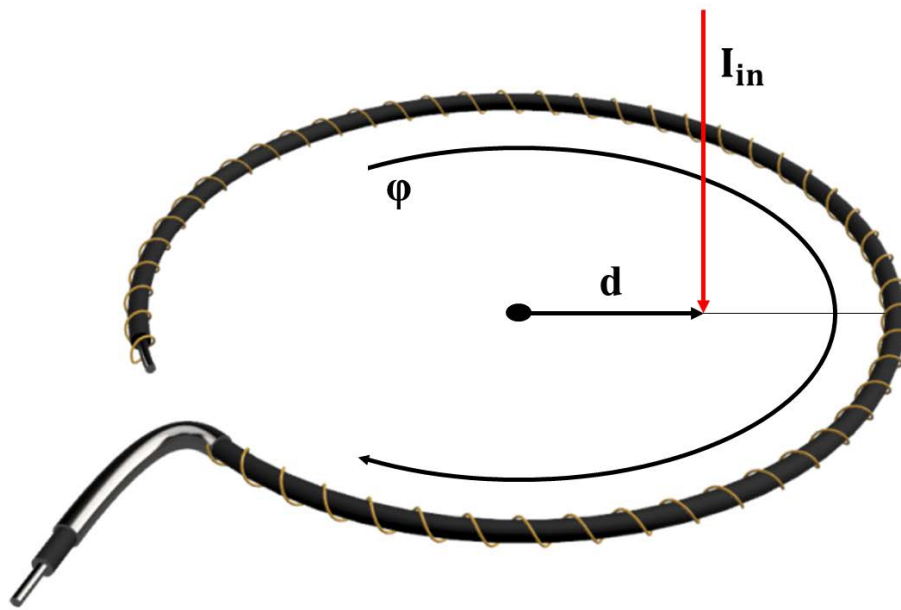
$$l^2 = d^2 + R^2 - 2dR\cos\alpha ,$$

$$d^2 = l^2 + R^2 - 2lR\cos\theta ,$$

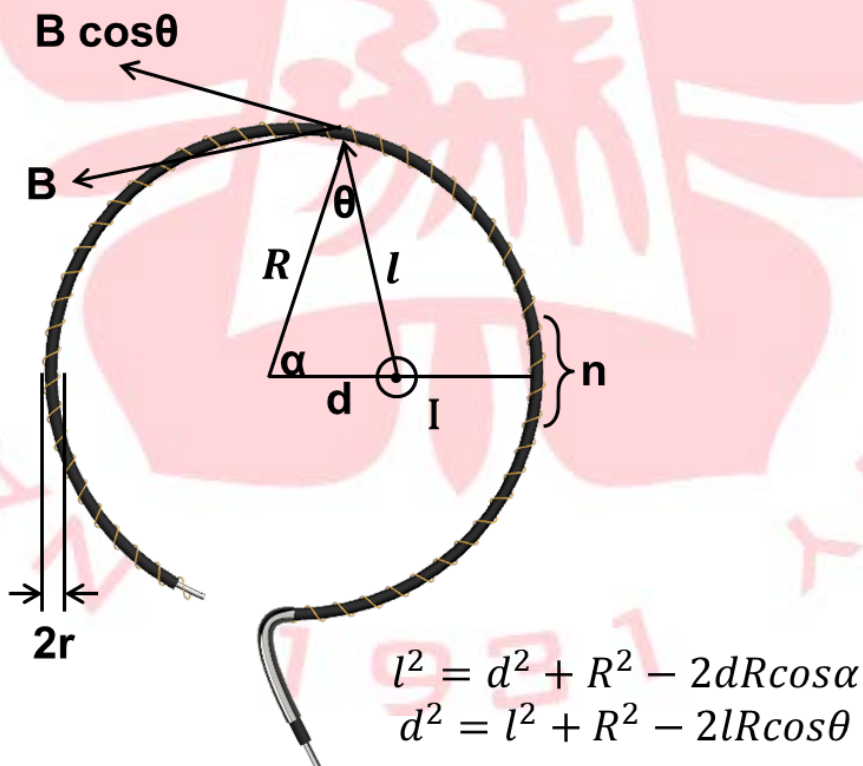
得：

$$\cos\theta = \frac{l^2 - d^2 + dR\cos\alpha}{lR}$$

結果如圖十六，可知輸入電流( $I_{in}$ )的位置與總磁通量( $\phi$  或  $\phi$ )無關。

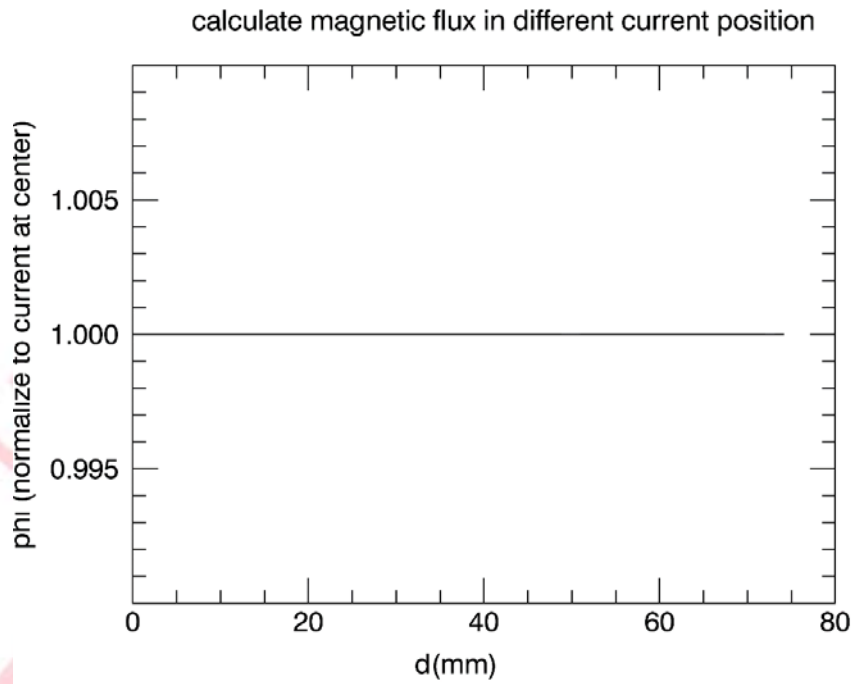


圖十四：輸入電流( $I_{in}$ )的位置與總磁通量( $\phi/\phi$ )



圖十五：計算 Rogowski coil 上的總磁通量( $\phi/\phi$ )與距離( $d$ )的關係時用到的參數





圖十六：電流產生的磁場對 Rogowski coil 每個位置做積分的結果

### (七) 利用波形產生器得到的實驗值與理論值的分析

見圖十七，波形產生器輸入正弦波形式的電壓 $V_{in}$ 經過電阻 $R$ 後可得其電流為 $I_{in} = \frac{V_{in}}{R}$ ，為了加強輸入的電流值，將輸入的電線繞過 Rogowski coil 十圈，輸入電流 $I_{in}$ 變為原本的十倍，而在右側接上示波器可量測 Rogowski coil 的輸出電壓 $V_{out}$ 。

因為將波形產生器設定為輸出正弦波，故理論上

$$V_{out} = M_{\text{Rogowski coil}} * \frac{dI_{in}}{dt}$$

可簡化為

$$V_{out} = M_{\text{Rogowski coil}} * \omega I_{in} ,$$

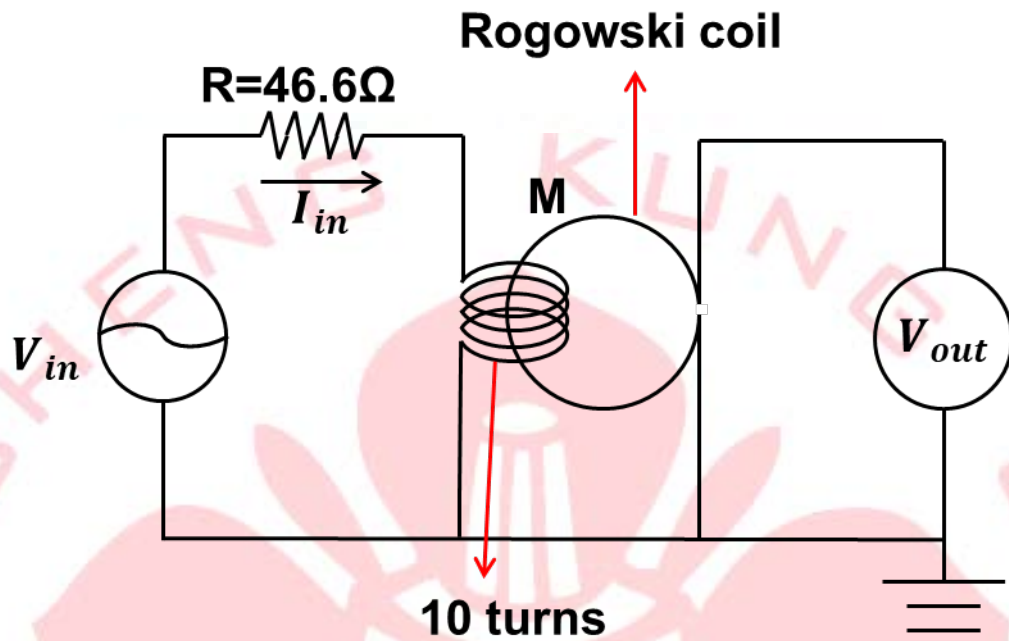
此處的 $\omega$ 可由波形產生器輸出正弦波的頻率決定，而 $V_{out}$ 則是理論上的輸出值。

而在實驗上，將 Rogowski Coil 實際上量到的輸出值做傅立葉轉換之後，取其與輸入值同頻率的振幅當作實驗值，實驗值與理論值的比值如圖十八，因其標準差小於數值的約 $\frac{1}{50}$ ，故實驗值與理論值是相符的。

將上述之實驗值與波形產生器的電流值做圖(圖十九)，可得到實際上這條 Rogowski Coil 量到的電壓所對應的電流值，其線性方程式為：

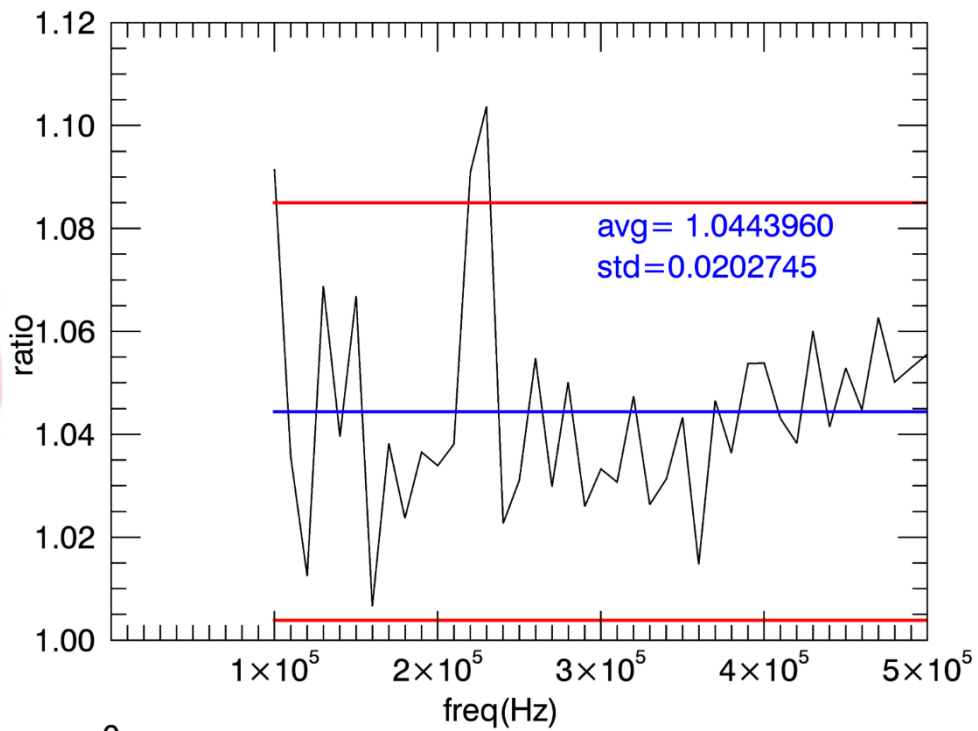
$$I_{in} * \omega = \frac{V_{out,th}}{M} = m * V_{out,exp} + c = 1.3 * 10^5 * V_{out,exp} + 8.4 * 10^3$$

分析資料時使用的程式參考雲端資料夾 10。

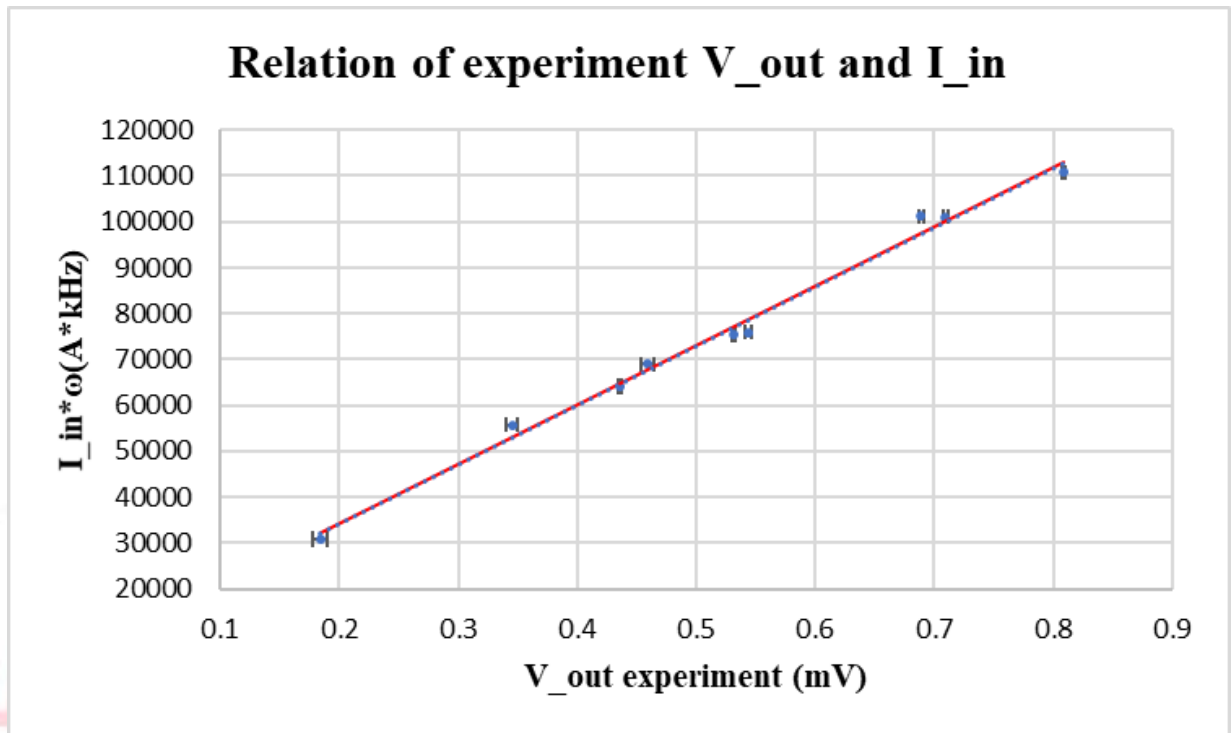


圖十七：利用波形產生器與理論值做比較的實驗架設圖

experiment/theory



圖十八：實驗值與理論值的比值



圖十九：實驗值與波形產生器的電流值做圖

## 結論

根據上述的分析，未來要使用此 Rogowski Coil 的資料時，可根據此線性方程式：

$$I_{in} * \omega = \frac{V_{out,th}}{M} = m * V_{out,exp} + c = 1.3 * 10^5 * V_{out,exp} + 8.4 * 10^3$$

得到 Rogowski coil 輸入端的電流值，未來會同時使用 Rogowski coil 及另一個已校正的感應電流計，量測通過圓柱形導線陣列的電流，針對 Rogowski Coil 做進一步的校正，之後會做一個積分器，直接量測中間通過的電流值。

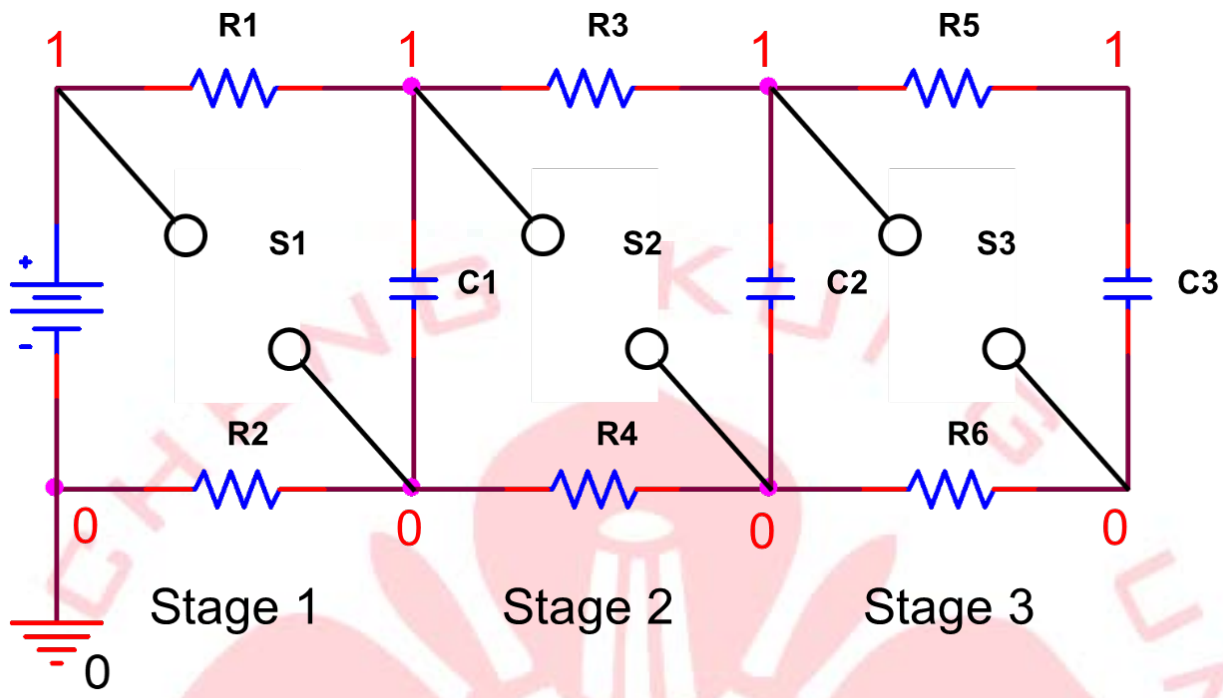
## 四、Marx Generator 的輸出模擬

Marx Generator 用來產生觸發軌道間隙開關的訊號，在製作 Marx Generator 之前，先用電腦程式模擬其輸出的訊號應為何，之後碰到實際上的問題時可從這裡找到解決問題的方法。

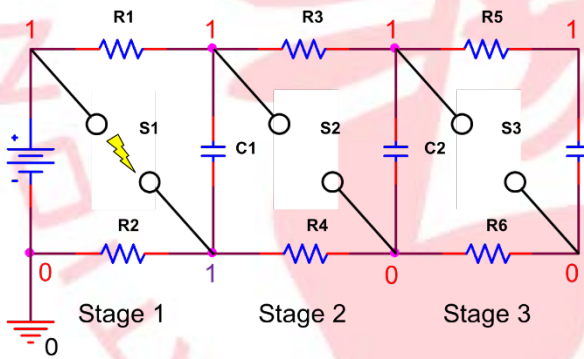
### (一) Marx generator

如圖二十所示，此為 Marx generator 的電路圖，R 代表電阻，C 代表電容，S 代表 spark gap switch，當兩端電壓超過其設定的值後，兩端從通路變為短路，電線旁的紅色數字 1 代表充電的初始電壓，依此類推，2、3...代表初始電壓的 2 倍、3 倍...

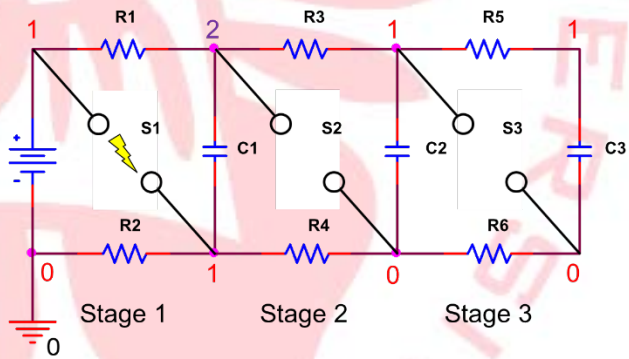
見圖二十一，當 S1 導通時 R2 右側的電壓變為 1，意即變為初始電壓之 1 倍。見圖二十二，因電容 C1 原本就有儲存能量，意即其兩端電壓差為 1，C1 下方之電壓提升為 1 時，因為 C1 儲存的能量尚未釋放，電容兩端電壓差須為 1，故 C1 上方的電壓提升為 2，又因 R1 的電阻值設計成讓 RC 放電的時間遠長於整個事件運作的時間，故所有電阻在 Marx Generator 中的功用為分隔兩端的電壓。見圖二十三、二十四，同理類推，Stage 2 與 Stage 3 能分別將電壓提升至初始電壓的 2 倍與 3 倍。



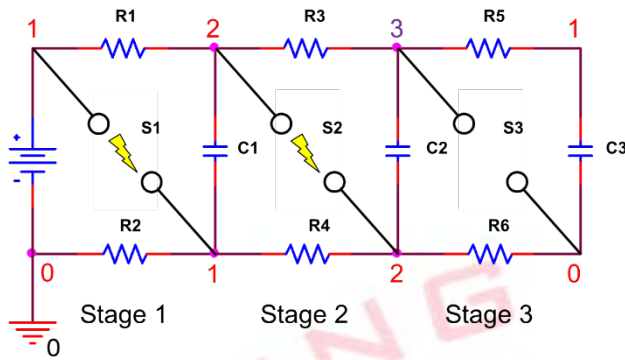
圖二十：Marx Generator 電路圖



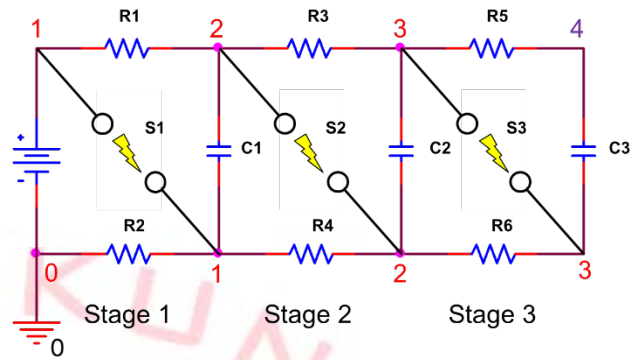
圖二十一：Stage 1 中 Switch 1 導通



圖二十二：Stage 1 中 Capacitor 1 感應電壓至 2 倍



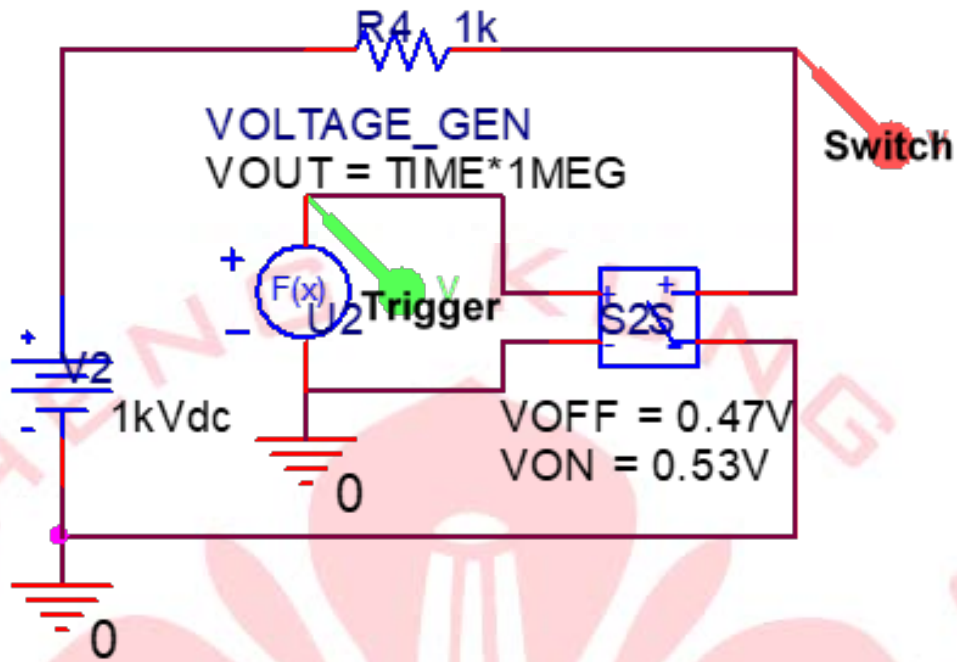
圖二十三：Stage 2 將電壓提升至 3 倍



圖二十四：Stage 3 將電壓提升至 4 倍

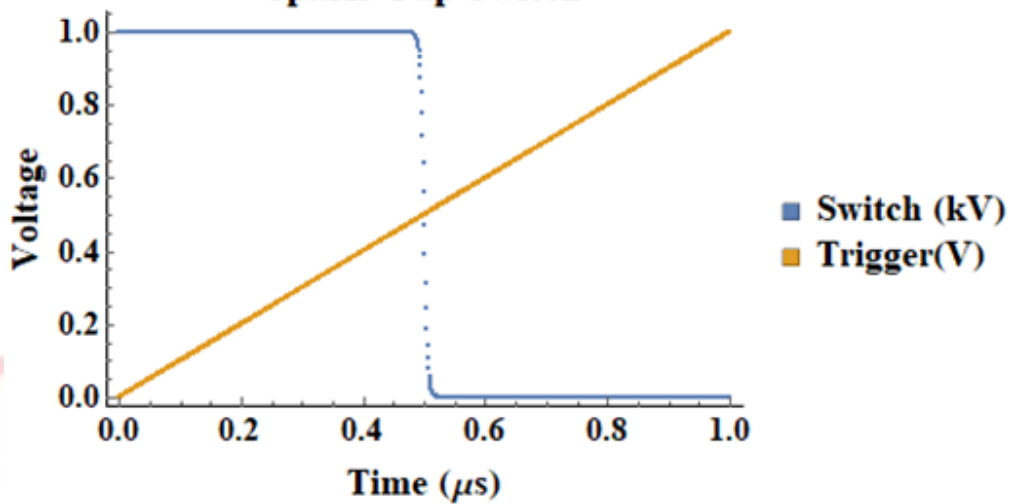
## (二) 模擬建置-時控 Spark Gap Switch 元件

這裡使用先 PSpice 電路模擬軟體來呈現，首先要設計 Spark Gap Switch 的電路。聲明一點，這個方法並不是實際上 Spark Gap Switch 的運作原理，而是在此軟體上能產生與 Spark Gap Switch 相同的效果。這裡使用訊號產生器元件  $F(x)$ (圖二十五)，其功能為產生與輸入的時間函數  $f(t)$  相等的電壓值，在這裡設定為  $f(t) = 10^6 t$ ，目的為當時間為  $1\mu s$  時電壓為  $1V$  (圖二十六中的 trigger (V) 線)。另外使用電壓控制電阻開關元件 S2S(圖二十五)，其功能為當輸入的電壓差小於  $V_{OFF}$  時為通路、大於  $V_{ON}$  時為斷路，而界於其中時用 Error function 平滑的連接兩個值(圖二十六中的 Switch (kV) 線)，這裡將電壓控制電阻開關元件 S2S 設定  $V_{OFF} = 0.47 V$  至  $V_{ON} = 0.53 V$ ，目的為讓開關於  $0.47\mu s$  至  $0.53\mu s$  間以 Error function 平滑變為通路，本文將訊號產生器元件  $F(x)$  與電壓控制電阻開關元件 S2S 組合稱為時控 Spark Gap Switch 元件。



圖二十五：

Spark Gap Switch

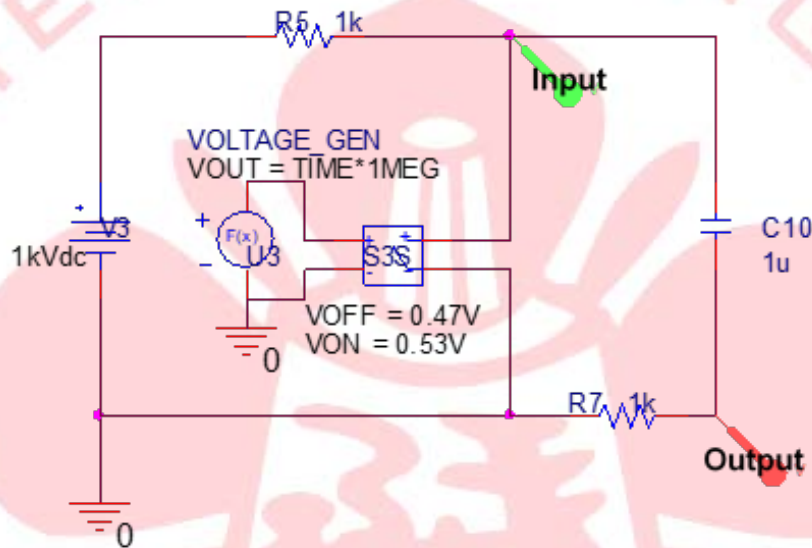


圖二十六

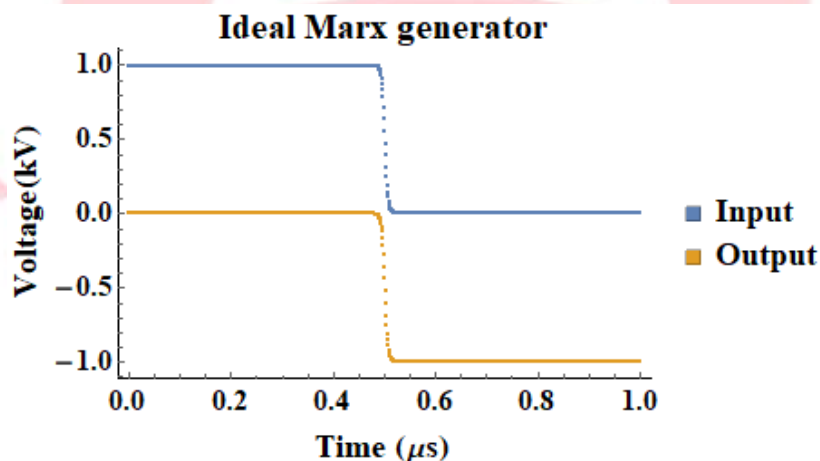


### (三) 模擬建置-一階 Marx Generator

圖二十七為一階(1 stage) Marx Generator，中間有一時控 Spark Gap Switch 元件，參考圖二十七與二十八，在開關變為通路前，Input 的位置為初始電壓 1，Output 由於隔著電容 C10，電壓為 0，當開關變為通路後，Input 因為與地形成短路，故電壓為 0，而 Output，因電容有儲能，兩端的跨壓須為 1，故將 Output，感應為-1，此種設計稱為反向一階 Marx Generator。



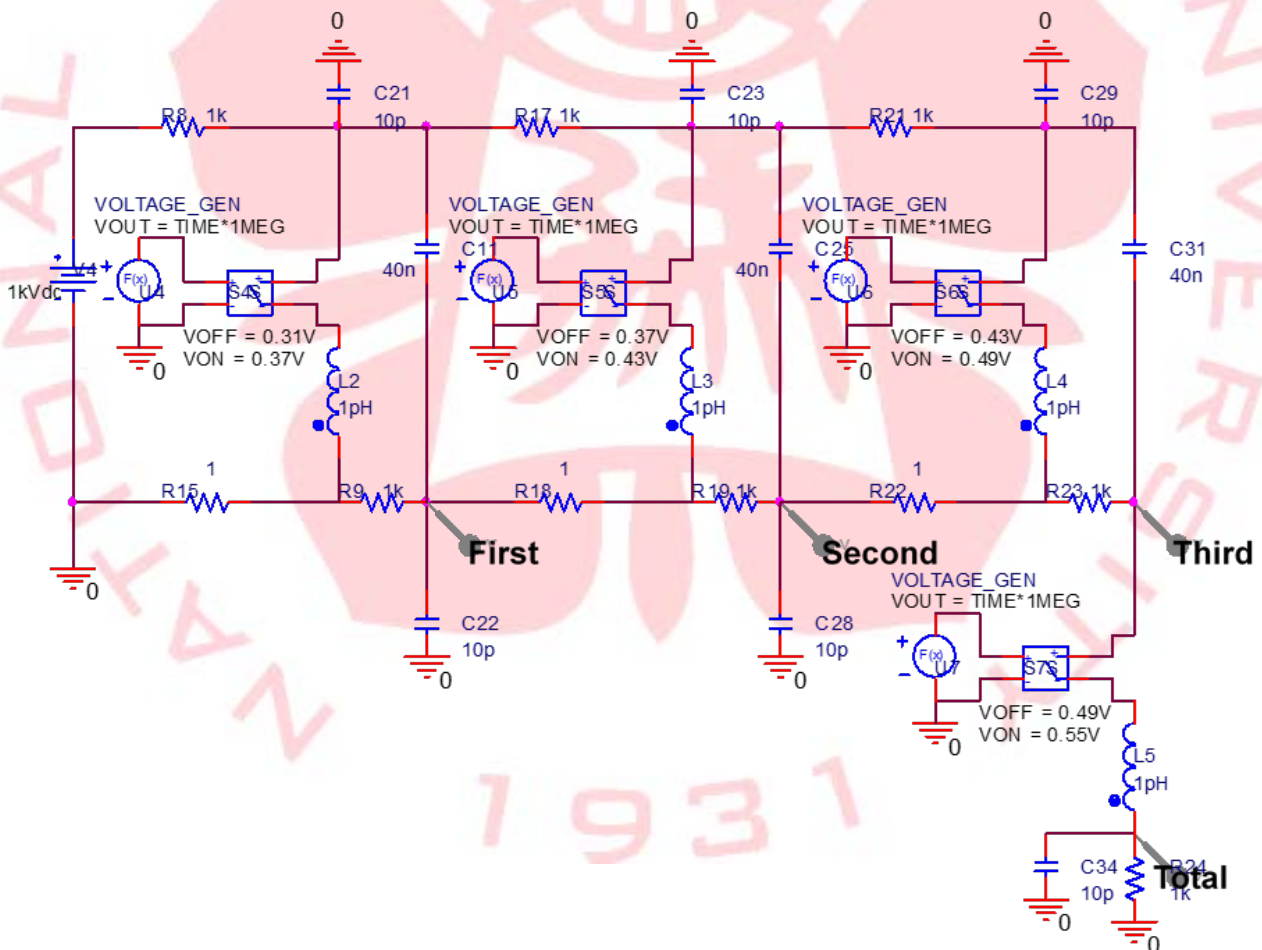
圖二十七：一階反向 Marx Generator



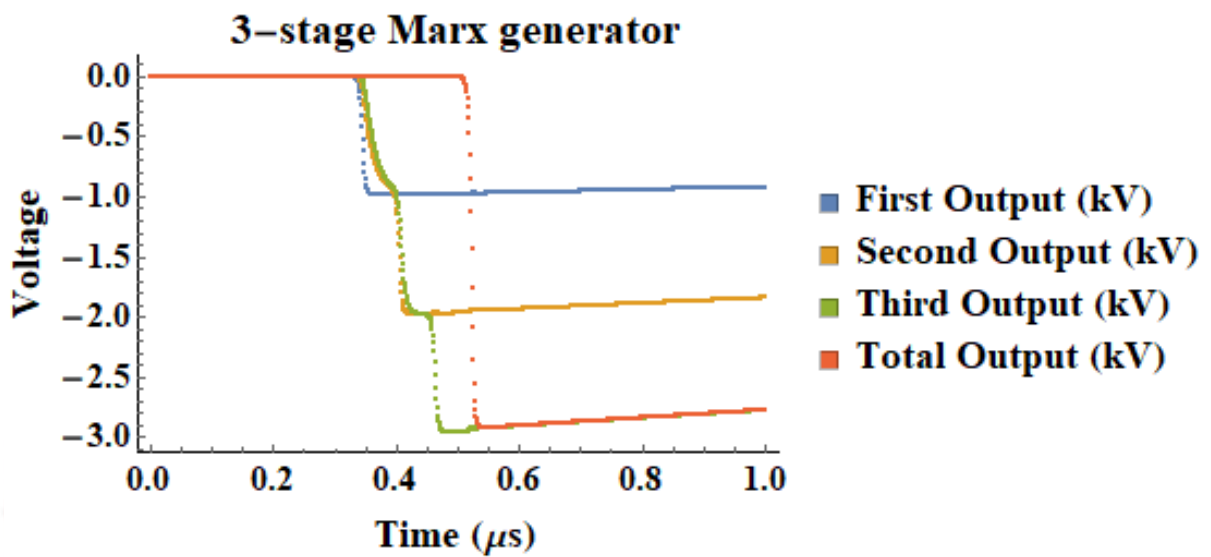
圖二十八：一階反向 Marx Generator 輸入與輸出電壓

#### (四) 模擬建置-三階半真實 Marx Generator

圖二十九呈現三階半真實 Marx Generator，使用三個一階 Marx Generator 串接而成，每個電壓不為零的接點對地都有一個感應電容 (C21, C22, C23, C28, C29, C34)，Spark Gap Switch 有其電感 (L2, L3, L4, L5)，即為三階半真實 Marx Generator，其中測量點 (First, Second, Third, Total) 的量測值如圖三十，First, Second, Third 分別為 Marx generator 一階、二階及三階的輸出值，而 Total 為最後將階梯狀訊號去除掉的總輸出值，其中 Third 電壓點為階梯狀訊號，因階梯狀訊號的總斜率較非階梯狀訊號小，故若能將階梯狀訊號改為一次降到 Marx Generator 的目標輸出電壓，其斜率能夠變大。若要去掉階梯狀訊號，要在 Third 電壓點後再接一個 Spark Gap Switch，即可讓電壓到達目標值時再放電 (Total 電壓點)，效果如圖三十。



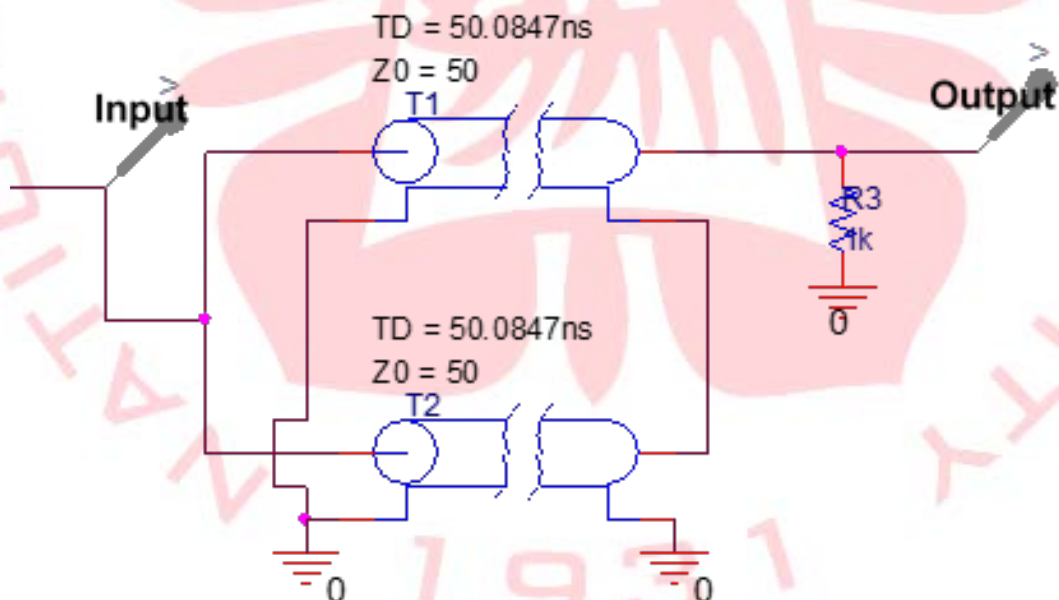
圖二十九：三階半真實 Marx Generator 電路圖



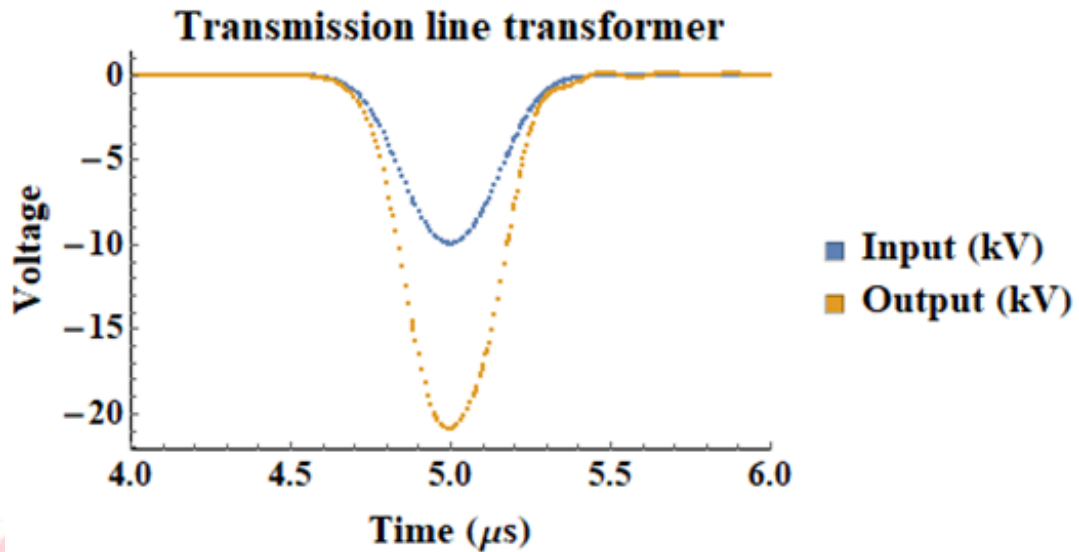
圖三十：三階半真實 Marx Generator 測量點的量測值

### (五) 傳輸線變壓器

見圖三十一，其中 T1 與 T2 為 Transmission Line 元件，圖三十二之 Input 與 Output 可見其亦可將電壓放大。



圖三十一：Transmission Line Transformer 電路圖



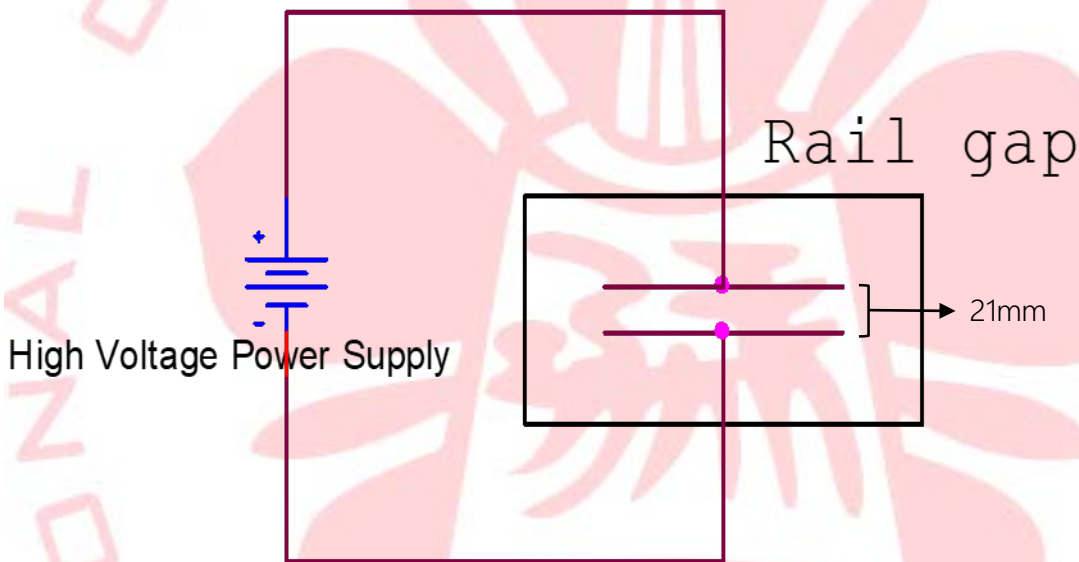
圖三十二：Transmission Line Transformer 測量點的量測值

#### (六) 結論

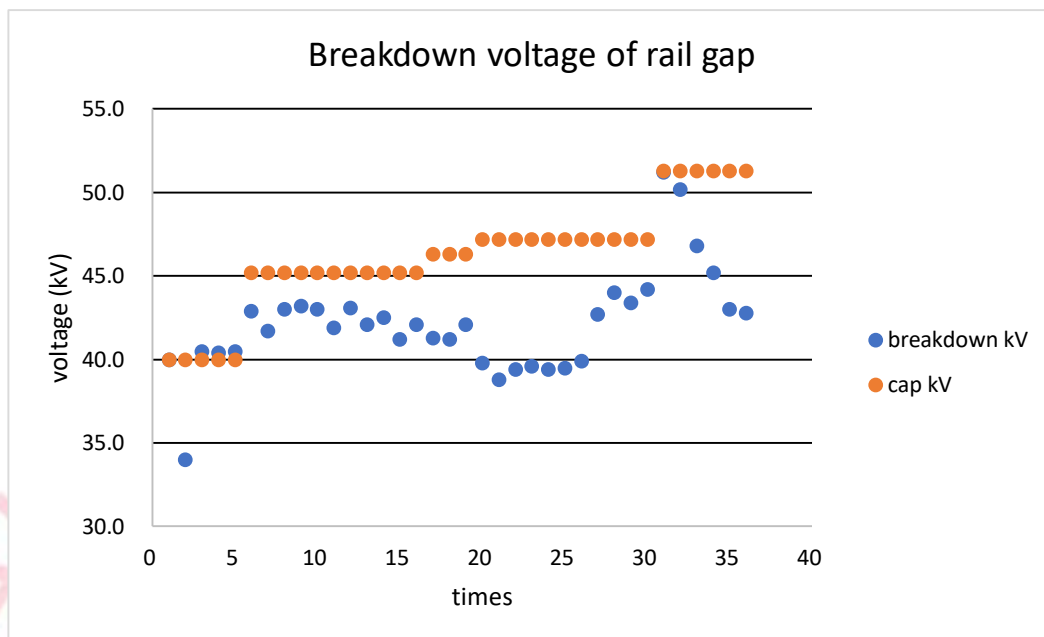
未來使用 Marx Generator 時可以從此模擬得知一些影響輸出訊號的變因，如圖二十九中 spark gap switch 的電感若非 1pH 或是對地電容若非 10p，則輸出結果亦會不同，調整這些參數值去吻合實驗結果，亦可猜測實驗上是哪裡與所想的不同。

## 五、軌道間隙開關崩潰電壓測試

若要提升來源之一為脈衝功率系統的功率，則須降低系統中的電感值，系統中主要的電感來自於開關，故使用軌道狀的金屬當作電極，可增加導通發生的區域，若多處導通，相當於每處的電感並聯，以此降低開關整體的電感。第一步是測試開關的崩潰電壓見圖三十三，電極兩端的間距為 21mm，在室壓的空氣中放電，將 Rail Gap 兩端接上高壓電源，充電直到自行崩潰放電，圖三十四中的 cap 為電源供應器設定的最高電壓，耐壓測試結果的平均值與標準差為  $42\pm 3\text{kV}$ 。



圖三十三：Rail gap 測試電路圖



圖三十四：Rail gap 測試資料，平均值與標準差為  $42 \pm 3 \text{ kV}$



## 六、總結

今年已完成的事情

1. Rogowski Coil 的製作與量測資料分析
2. Marx Generator 的模擬
3. 軌道間隙開關的崩潰電壓測試

未來將完成的事情

1. 重做一條 Rogowski Coil 並完成其校正
2. PPCB 中的同心圓柱將被擦拭與組裝
3. 組裝第二顆軌道間隙開關
4. 組裝圓柱形導線陣列
5. 製作雷射系統以拍攝電漿噴流

## 附錄一

實驗資料皆置於雲端資料夾中，詳細檔案位置如下：

Rogowski coil 實驗資料

experiment\2018073001\_Rogowski\_coil\_measurement\_using\_function\_generator\...

\1. surroundings\_pretest

\2. inductance\_measurement

\3.

input\_and\_output\_voltage\_in\_phase\_diagram\_change\_frequency\_  
from\_100kHz\_to\_1000kHz\_interval\_50kHz\_fixed\_vpp\_10V

\4.

input\_and\_output\_voltage\_in\_phase\_diagram\_change\_frequency\_  
from\_100kHz\_to\_500kHz\_interval\_50kHz\_fixed\_vpp\_10V

\5.

input\_and\_output\_voltage\_in\_phase\_diagram\_change\_frequency\_  
from\_200kHz\_to\_350kHz\_interval\_10kHz\_fixed\_vpp\_10V

\6. output\_voltage\_using\_fft\_change\_frequency\_from\_100kHz\_to\_  
1000kHz\_interval\_10kHz\_fixed\_vpp\_10V

\7. input\_voltage\_using\_fft\_change\_frequency\_from\_100kHz\_to\_  
500kHz\_interval\_10kHz\_fixed\_vpp\_10V

\8. output\_voltage\_using\_fft\_change\_frequency\_from\_100kHz\_to\_  
500kHz\_interval\_10kHz\_fixed\_vpp\_10V

\9. output\_voltage\_using\_fft\_change\_voltage\_from\_2V\_to\_10V\_  
interval\_1V\_fixed\_frequency\_100khz



**\10. programs**

**\11. ppts\_and\_documents**

