

# 三相逆變器實驗模組

PEK-130

---

使用手冊

固緯料號 NO. 82EK-11000M01



ISO-9001 認證企業

**GW INSTEK**

本手冊所含資料受到版權保護，未經固緯電子實業股份有限公司預先授權，不得將手冊內任何章節影印、複製或翻譯成其它語言。

本手冊所含資料在印製之前已經過校正，但因固緯電子實業股份有限公司不斷改善產品，所以保留未來修改產品規格、特性以及保養維修程式的權利，不必事前通知。

# 目錄

簡介 .....	3
章節說明 .....	9
<b>實驗 1 三相 SVPWM 逆變器 .....</b>	<b>10</b>
實驗目的 .....	10
實驗原理 .....	10
電路模擬 .....	21
SimCoder 程式規劃及電路模擬 .....	23
實驗設備 .....	31
實驗步驟 .....	32
實驗結果 .....	34
<b>實驗 2 三相獨立式逆變器 .....</b>	<b>38</b>
實驗目的 .....	38
實驗原理 .....	38
電路模擬 .....	46
SimCoder 程式規劃及電路模擬 .....	50
實驗設備 .....	54
實驗步驟 .....	55
實驗結果 .....	57
<b>實驗 3 三相並網逆變器 .....</b>	<b>63</b>
實驗目的 .....	63
實驗原理 .....	63
電路模擬 .....	72
SimCoder 程式規劃及電路模擬 .....	75
實驗設備 .....	77
實驗步驟 .....	78
實驗結果 .....	81

---

<b>實驗 4 單相三臂式整流逆變器</b> .....	<b>84</b>
實驗目的 .....	84
實驗原理 .....	84
電路模擬 .....	91
SimCoder 程式規劃及電路模擬 .....	93
實驗設備 .....	94
實驗步驟 .....	95
實驗結果 .....	98
<b>附錄 A PEK-130 電路圖</b> .....	<b>107</b>
<b>附錄 B C code 燒錄流程</b> .....	<b>118</b>
<b>附錄 C RS232 連線</b> .....	<b>127</b>

# 簡介

PEK-130 為三相逆變器模塊(Three Phase Inverter Module)，如圖 0.1 所示，為三相三線全橋逆變器(Three Phase Three Wire Inverter)架構，其為全數位控制系統，實施方法如圖 0.2，目的在提供電力轉換器採用數位控制的學習平台，讓使用者透過 PSIM 軟體，除以模擬方式學習電力轉換器的原理、分析及設計外，亦可透過 PSIM 之 SimCoder 工具將控制電路轉換為數位控制程式，並可實際將以 DSP 取代之電路再作一次模擬，最後並可將透過模擬驗證過之控制程式燒錄於 DSP 晶片中，再透過 DSP 進行控制及通訊，以驗證所設計電路及控制器之正確性。

圖 0.1  
三相逆變器實驗  
模組

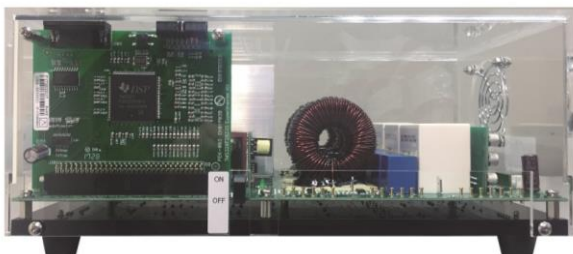
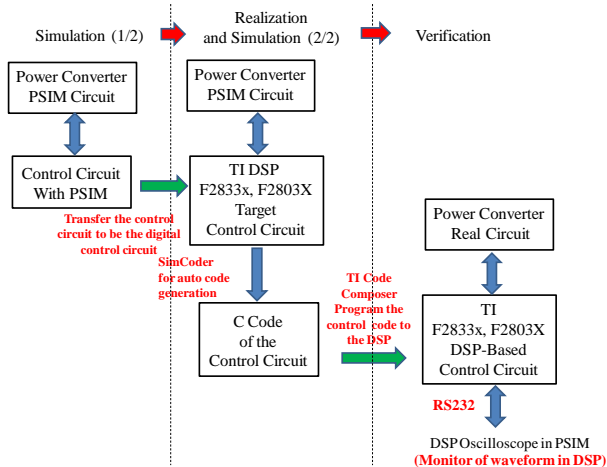


圖 0.2  
教具使用程序



PEK-130 共可完成四個實驗，分別如下：

三相 SVPWM 逆變器(Three Phase SVPWM Inverter)

三相獨立式逆變器(Three Phase Stand-alone Inverter)

三相並網逆變器(Three Phase Grid-connected Inverter)

單相三臂式整流逆變器(Single Phase Three-arm Rectifier-Inverter)

進行實驗時除需要 PEK-130 本身外，仍需搭配 PEK-005A(輔助電源，如圖 0.3)與 PEK-006 (JTAG 燒錄器，如圖 0.4)並在 PTS-3000 的實驗平台上完成，如圖 0.5。

圖 0.3  
輔助電源模組

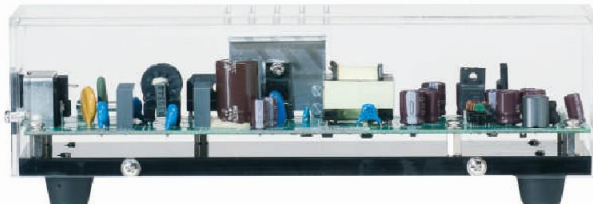


圖 0.4  
JTAG 燒錄器

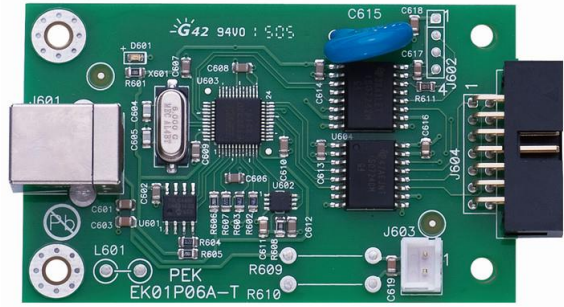


圖 0.5  
PTS-3000 實驗  
平台





PEK-130 電路圖可參考附錄 A，可區分為功率電路、感測電路、驅動電路以及保護電路。其中感測電路分為兩部分，其一為測試點量測使用，另一部分為回授 DSP 控制使用，其衰減倍率各不相同，分別如下表 0-1 與 0-2，

表 0.1 PEK-130 測試點的量測比例

	感測項目	感測比例
1	直流鍊電壓(VDC)	0.037
2	逆變器 A 相輸出電流(IO-A)	0.8
3	逆變器 B 相輸出電流(IO-B)	0.8
4	逆變器 C 相輸出電流(IO-C)	0.8
5	逆變器 A 相負載電流(IL-A)	0.8
6	逆變器 B 相負載電流(IL-B)	0.8
7	逆變器 C 相負載電流(IL-C)	0.8
8	逆變器輸出 AB 臂線電壓(VO-AB)	0.019
9	逆變器輸出 BC 臂線電壓(VO-BC)	0.019
10	逆變器輸出 CA 臂線電壓(VO-CA)	0.019
11	市電 AB 臂線電壓(VS-AB)	0.019
12	市電 BC 臂線電壓(VS-BC)	0.019
13	市電 CA 臂線電壓(VS-CA)	0.019

表 0.2 PEK-130 DSP 的回授比例

	感測項目	感測比例
1	直流鍊電壓(VDC)	0.02
2	逆變器 A 相輸出電流(IO-A)	0.3
3	逆變器 B 相輸出電流(IO-B)	0.3
4	逆變器 C 相輸出電流(IO-C)	0.3
5	逆變器 A 相負載電流(IL-A)	0.3
6	逆變器 B 相負載電流(IL-B)	0.3
7	逆變器 C 相負載電流(IL-C)	0.3
8	逆變器輸出 AB 臂線電壓(VO-AB)	0.01
9	逆變器輸出 BC 臂線電壓(VO-BC)	0.01

---

10	逆變器輸出 CA 臂線電壓(VO-CA)	0.01
11	市電 AB 臂線電壓(VS-AB)	0.01
12	市電 BC 臂線電壓(VS-BC)	0.01
13	市電 CA 臂線電壓(VS-CA)	0.01

## 章節說明

章節安排如下

---

簡介	簡略介紹本模組的實驗方式、實驗項目、電路組成以及各章節內容等。
實驗 1 三相 SVPWM 逆變器	學習三相 SPWM、Space Vector PWM 等之原理、三相逆變器模組之開迴路電壓及電流量測方法，TI F28335 DSP IC 腳位規劃、DSP 之 PWM 及 A/D 模組設定、RS232 監控 DSP 內部信號之方法等。
實驗 2 三相獨立式逆變器	學習三相逆變器之模式化方法、abc-dq 等軸轉換方法、電流迴路及電壓迴路控制器設計、RMS 電壓迴路設計、逆變器之硬體規劃及 SimCoder 程式撰寫等。
實驗 3 三相並網逆變器	學習三相市電並聯之鎖相迴路方法、電流迴路及電壓迴路控制器設計、硬體規劃及並網之 SimCoder 程式撰寫等。
實驗 4 單相三臂式整流逆變器	電路由於有三臂，因此也可用於單相 on-line UPS，本實驗將學習 UPS 之工作模式、Rectifier 及 Inveter 之電流迴路及電壓迴路控制器設計、硬體規劃及 SimCoder 程式撰寫等。

---

# 實驗 1 三相 SVPWM 逆變器

## 實驗目的

學習三相 SPWM、Space Vector PWM 等之原理、三相逆變器模組之開迴路電壓及電流量測方法，TI F28335 DSP IC 腳位規劃、DSP 之 PWM 及 A/D 模組設定、RS232 監控 DSP 內部信號之方法等。

## 實驗原理

### 1.1 三相 SPWM

SPWM 弦波脈波寬度調變技術原理為由控制器產生的三相正弦波電壓命令與三角波做比較，經過比較器，產生脈波寬度調變訊號驅動逆變器，並使其輸出近似弦波且為等幅不等寬的電壓波形。根據弦波電壓和三角波的大小和頻率，可定義為下列兩個指標，其一為調變指標 (Modulation Index) 為：

$$m_a = \frac{\hat{V}_{control}}{\hat{V}_{tri}} \quad (1.1)$$

式中  $V_{control}$  為三相弦波電壓峰值大小， $V_{tri}$  為三角波峰值的大小。

其二為頻率調變比 (Frequency modulation ratio)，定義為：

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (1.2)$$

式中  $f_s$  為三角波頻率， $f_1$  為弦波電壓頻率。

圖 1.1  
三相逆變器電路

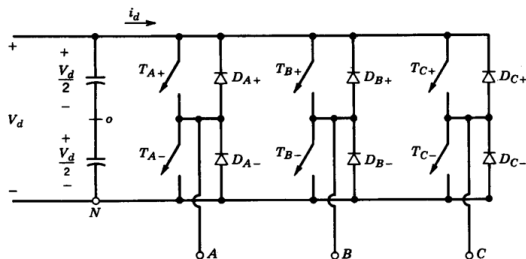


圖 1.2  
SPWM

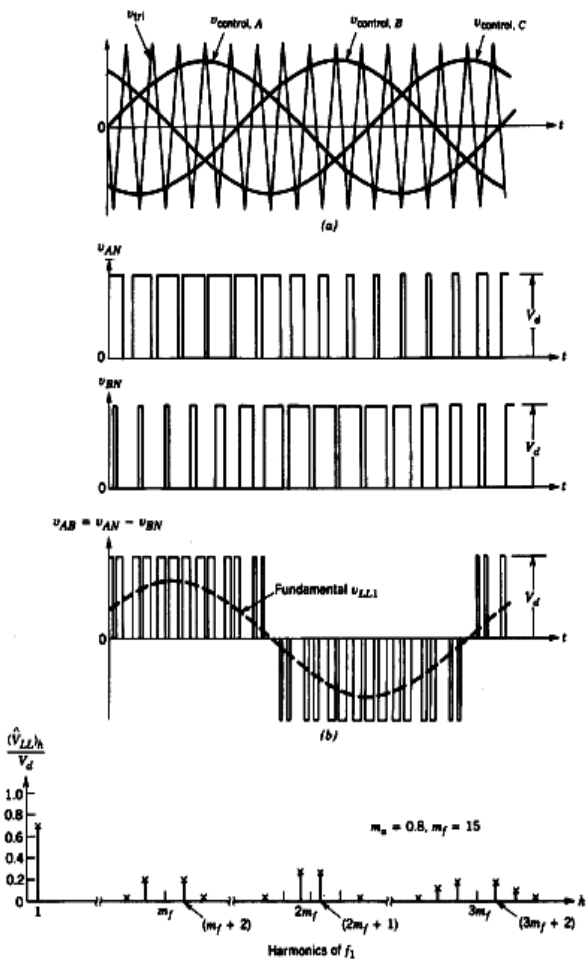


圖 1.1 以 A 相為例，電壓  $V_{AN}$  其基本波的峰值可用下式表示：

$$(\hat{V}_{AN})_1 = m_a \frac{V_d}{2} \tag{1.3}$$

則基本波線-線電壓大小(RMS)為：

$$\begin{aligned} V_{LL1} \text{ (line-line, rms)} &= \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} (\hat{V}_{AN})_1 \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} m_a V_d \\ &\cong 0.612 m_a V_d \quad (m_a \leq 1.0) \end{aligned} \tag{1.4}$$

當  $m_a \leq 1$  時，稱為逆變器的線性調變區，亦即當輸入弦波電壓命令的峰值比三角波峰值小時，輸入電壓大小會與逆變器輸出電壓基本波的線-線電壓大小成正比。

### 1.2 三相空間向量 PWM (Space Vector PWM, SVPWM)

空間向量脈波寬度調變即是利用電壓空間向量的觀念，藉由逆變器之六個功率元件的開關切換狀態來產生旋轉的電壓向量空間，典型的三相變頻器如圖 1.3 所示，其每相各有兩個開關元件置於上臂及下臂，分別為上臂的  $S_1$ 、 $S_3$ 、 $S_5$  及下臂的  $S_2$ 、 $S_4$ 、 $S_6$ 。在空間向量脈波寬度調變的控制模式下，逆變器每相開關元件之導通狀態為互補式，即代表若上臂導通則下臂截止，反之若上臂截止則下臂導通。

在控制上通常在開關導通前加入一延遲時間以避免上臂與下臂功率元件同時導通造成功率元件的損壞，此一延遲時間稱之為死區時間。

在此定義開關導通狀態 a、b、c 相每一臂之開關導通狀態，若  $a = 1$  則代表上臂開關導通下臂開關截止， $a = 0$  則代表上臂開關截止下臂開關導通。因此三相逆變器之輸出狀態共有八種，每一種狀態產生的線對線電壓，相電壓之輸出結果(直流鏈電壓為 VDC)列於表 1.1。

圖 1.3  
典型三相電力逆變器之架構

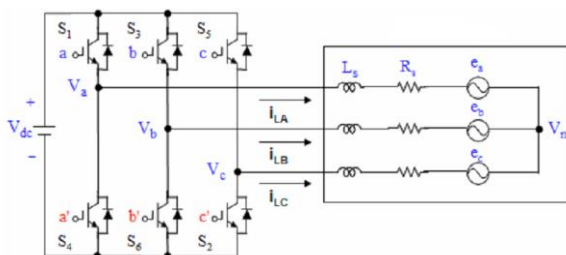


表 1.1  
三相逆變器切換  
之狀態

Voltage Vectors	Switching Vectors			Line to neutral voltage			Line to line voltage		
	a	b	c	$V_{an}$	$V_{bn}$	$V_{cn}$	$V_{ab}$	$V_{bc}$	$V_{ca}$
$V_0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$V_1$	1	0	0	2/3	-1/3	-1/3	1	0	-1
$V_2$	1	1	0	1/3	1/3	-2/3	0	1	-1
$V_3$	0	1	0	-1/3	2/3	-1/3	-1	1	0
$V_4$	0	1	1	-2/3	1/3	1/3	-1	0	1
$V_5$	0	0	1	-1/3	-1/3	2/3	0	-1	1
$V_6$	1	0	1	1/3	-2/3	1/3	1	-1	0
$V_7$	1	1	1	0	0	0	0	0	0

由表 1.1 可以得知，三相逆變器輸出之相電壓和線間電壓之關係，經由座標軸轉換至  $\alpha\beta$  平面上可得表 1.2，其轉換之關係式為：

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

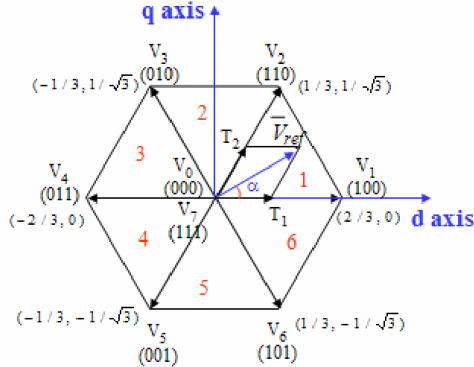
表 1.2  
開關切換狀態

	$V_\alpha$	$V_\beta$
$\vec{V}_0$	0	0
$\vec{V}_1$	$-\frac{V_{DC}}{3}$	$-\frac{V_{DC}}{3}$
$\vec{V}_2$	$-\frac{V_{DC}}{3}$	$\frac{V_{DC}}{3}$
$\vec{V}_3$	$-\frac{2V_{DC}}{3}$	0
$\vec{V}_4$	$\frac{2V_{DC}}{3}$	0
$\vec{V}_5$	$\frac{V_{DC}}{3}$	$-\frac{V_{DC}}{\sqrt{3}}$
$\vec{V}_6$	$\frac{V_{DC}}{3}$	$\frac{V_{DC}}{\sqrt{3}}$
$\vec{V}_7$	0	0

因此藉由此八種開關切換狀態將可得到八種不同的電壓向量。此八個電壓向量稱為基本電壓向量，分別為六個有效電壓向量 $\vec{V}_1$ 、 $\vec{V}_2$ 、

$\vec{V}_3$ 、 $\vec{V}_4$ 、 $\vec{V}_5$ 、 $\vec{V}_6$  及兩個零向量  $\vec{V}_0$  及  $\vec{V}_7$ 。因此可利用此六個有效電壓向量將電壓空間平面分為六個區間，如圖 1.4 所示。其中  $\vec{V}_{ref}$  為輸出之參考電壓向量。

圖 1.4  
基本向量空間



任何大小之輸出之參考電壓  $\vec{V}_{ref}$  可以用圖 1.4 之六個有效電壓向量中之任兩個向量表示，而此輸出電壓在這兩個有效電壓向量之分量(導通時間)可用代數方法求得。

### 1.3 軸轉換

#### (1) 靜止座標軸轉換

將三相 abc 靜止座標軸轉換至  $\alpha\beta$  靜止座標軸系統，此轉換稱為 Clark 轉換。依據圖 1.5 所示兩個座標系統之間的關係，得出如下(1.5)式的座標轉換式：

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \\ f_o \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \tag{1.5}$$

其中：

$f_\alpha, f_\beta, f_o$  為電壓及電流等在  $\alpha\beta$  軸下的變數量

$f_a, f_b, f_c$  為電壓及電流等在 abc 軸下的變數量



$$[T] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \text{ 為座標軸矩陣}$$

反之，將座標軸  $\alpha\beta$  轉換至三相  $abc$  座標系統，此轉換稱為反 Clark 轉換，轉換公式可表示：

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \\ f_o \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

其中：

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \text{ 為座標軸矩陣}$$

以上為由三相  $abc$  座標系統與靜止座標系統之間關係式，其轉換矩陣前的未定係數，若是採用非功率不變法則此為  $\frac{2}{3}$ ，若是採用功率不變法則此為  $\frac{2}{3\sqrt{2}}$ ，本文是採用非功率不變法則。此外，對於三相平衡系統，因此在做靜止座標軸轉換時，零序分量  $f_o = \frac{1}{3}(f_a + f_b + f_c)$  是可被忽略的。圖 1.6 所示是採用 PSIM 模擬  $abc$  靜止座標軸轉換至  $\alpha\beta$  靜止座標軸之波形圖。

圖 1.5  
靜止座標軸

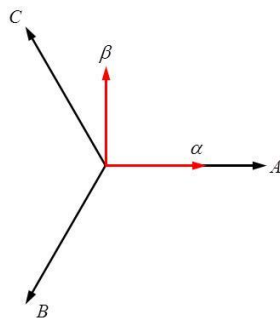
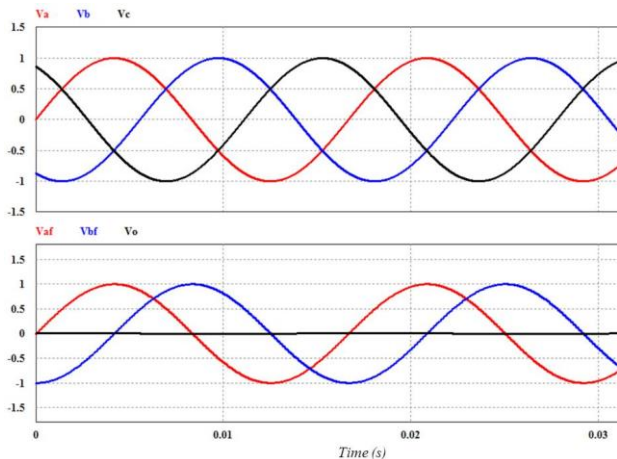


圖 1.6

PSIM 模擬靜止座標軸轉換波形圖



## (2) 同步旋轉座標軸轉換

前一節透過座標軸轉換將 abc 靜止座標系統轉換至  $\alpha\beta$  靜止座標軸系統，本節進一步將  $\alpha\beta$  靜止座標軸轉換至 DQ 同步旋轉座標軸系統，此轉換稱為 Park 轉換，此時假設三相系統為平衡，零軸分量可被忽略，並將 DQ 軸與  $\alpha\beta$  軸同時放在二維向量平面上，如圖 1.7 所示，此旋轉座標以  $\omega_e$  角速度來旋轉，故可得座標轉換公式：

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = [Q] \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

其中：

$$[Q] = \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & \sin(\theta_e) \\ -\sin(\theta_e) & \cos(\theta_e) \end{bmatrix}$$

反之，將旋轉座標系統 DQ 軸轉換至  $\alpha\beta$  座標系統，此轉換稱為反 Park 轉換，則轉換公式可表示：

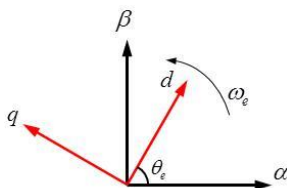
$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = [Q]^{-1} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

其中：

$$[Q]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & -\sin(\theta_e) \\ \sin(\theta_e) & \cos(\theta_e) \end{bmatrix}$$

$$\theta_e \text{ 為夾角，可表示為 } \theta_e = \int_0^t \omega_e dt + \theta_e(0)$$

圖 1.7  
同步旋轉座標軸



### (3) 任意旋轉座標軸轉換

以上兩節知道靜止座標軸轉換與同步旋轉軸轉換，也可以由 abc 座標系統投影至 DQ 座標軸上，如圖 1.8 所示，其可得座標轉換公式：

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_o \end{bmatrix} = [R] \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

其中：

$$[R] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_e) & -\sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

反之，將旋轉座標系統 DQ 軸轉換至  $\alpha\beta$  座標系統，此轉換稱為反 Park 轉換，則轉換公式可表示：

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = [R] \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_o \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

其中：

$$[R]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & -\sin(\theta_e) & 1 \\ \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix}$$

因此如果假設系統為一三相平衡系統，則零相分量

$f_o = \frac{1}{3}(f_a + f_b + f_c)$ ，可被忽略不計。

圖 1.8  
任意旋轉座標軸

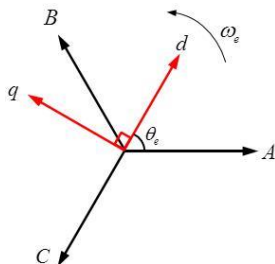
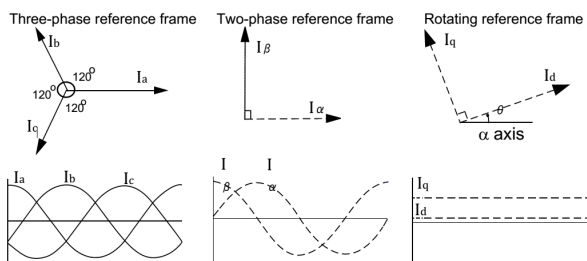


圖 1.9  
各式坐標軸



在進行上述 abc-dq 軸轉換之前，由於三相三線電路的電壓偵測電路所偵測到的電壓為線電壓( $V_{ab}$ 、 $V_{bc}$ 、 $V_{ca}$ )，因此需利用以下線電壓對相電壓 (Line-abc to Phase-abc) 之轉換以獲得  $V_{an}$ 、 $V_{bn}$  及  $V_{cn}$  等虛擬相電壓：

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} \tag{1.11}$$

### 1.4 零序注入 SVPWM

以數位方式來實現逆變器之控制，通常會以空間向量 PWM (Space Vector PWM, SVPWM) 來做為切換控制方式，因為其可以增進逆變器之電壓利用率及減少開關切換次數，然而其需要較多計算以決定開關導通及截止時間。零序注入 PWM 方式同樣可以達到 SVPWM 之優點，但計算簡單，因此近年來廣泛被採用。零序注入 PWM 原理如下，請參考圖 1.10，假設直流鏈電壓有一虛擬之中性點  $o$ ，則 A 臂及 B 臂相對於  $o$  點之電壓可表示為：

$$V_{ao} = V_{an} + V_{no} \tag{1.12}$$

$$V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \tag{1.13}$$

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn} \quad (1.14)$$

(1.14)指出線電壓中之  $V_{no}$  將會因兩臂差動而消除，因可利用  $V_{no}$  來增進逆變器電壓之利用率。各臂相對於  $o$  點之電壓範圍如下：

$$\frac{-V_d}{2} \leq V_{ao} \leq \frac{V_d}{2} \quad (1.15)$$

因此

$$\frac{-V_d}{2} \leq V_{an} + V_{no} \leq \frac{V_d}{2} \quad (1.16)$$

由(1.16)可得  $V_{no}$  電壓的範圍如下：

$$\frac{-V_d}{2} - V_{an} \leq V_{no} \leq \frac{V_d}{2} - V_{an} \quad (1.17)$$

考慮  $V_{an}$  的電壓範圍，則

$$\frac{-V_d}{2} - V_{\min} \leq V_{no} \leq \frac{V_d}{2} - V_{\max} \quad (1.18)$$

其中

$$V_{\max} = \text{Max}(V_{an}, V_{bn}, V_{cn}) \quad (1.19)$$

$$V_{\min} = \text{Min}(V_{an}, V_{bn}, V_{cn}) \quad (1.20)$$

若設定  $V_{no}$  如下，則稱為均零值零序注入：

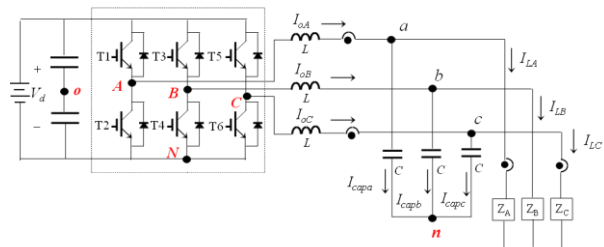
$$V_{no} = -\frac{1}{2}(V_{\max} + V_{\min}) \quad (1.21)$$

均零值零序注入 PWM 的控制電壓波形如圖 1.11 所示。本文將採用此方法來實現 PWM，將(1.21)代入(1.12)可得：

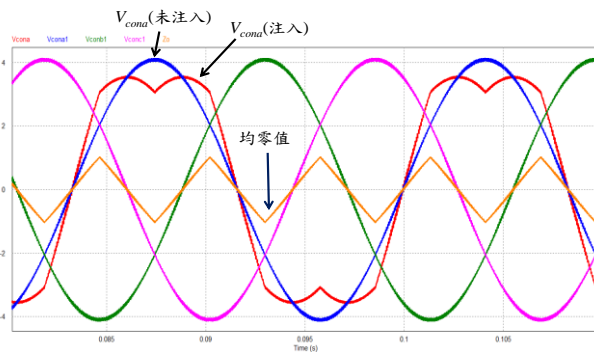
$$v_{coni} = V_{coni} - \frac{1}{2}(V_{con,\max} + V_{con,\min}) \quad (i=A, B, C) \quad (1.22)$$

其中  $V_{coni}$  為原控制電路計算得到之控制電壓， $v_{coni}$  則為均零注入後之控制電壓。

**圖 1.10**  
三相逆變器架構圖



**圖 1.11**  
均零值零序注入  
PWM



## 電路模擬

逆變器規格

DC Voltage  $V_d = 100V$

AC Voltage  $V_{LL} = 50V_{rms}$

$F_s = 18kHz$ ,  $V_{tri} = 10V_{pp}$  (PWM)

$C_d = 330\mu F$ ,  $L = 1mH$ ,  $C = 10\mu F$

$K_s = 0.3$  (current sensing factor)

$K_v = 0.01$  (AC voltage sensing factor)

$K_v = 0.02$  (DC voltage sensing factor)

根據上述參數所建置之模擬電路如圖 1.12 所示，在線性負載下之模擬結果如圖 1.13 所示。

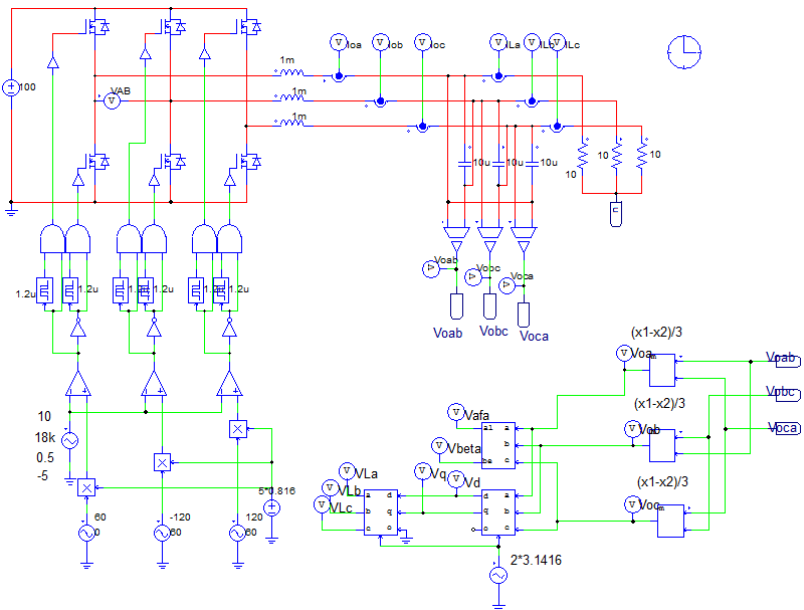


圖 1.12 逆變器 SPWM 及軸轉換模擬

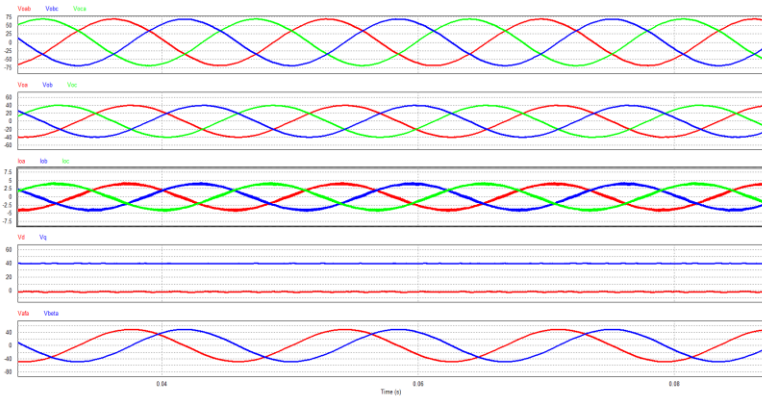


圖 1.13 逆變器 SPWM 及軸轉換模擬結果



## SimCoder 程式規劃及電路模擬

以下進入第二階段，將上述類比控制器予以數位化，步驟如下：

### (1) 主電路及感測建立

逆變器主電路及感測電路如圖 1.14 所示，需掌握感測值須在範圍:DC:0~3V，AC:-1.5V~1.5V。

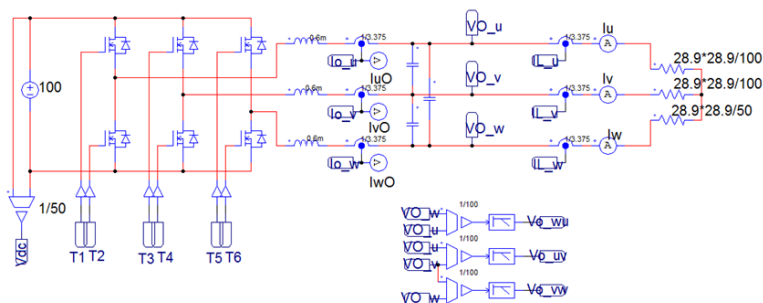


圖 1.14 逆變器主電路及感測電路

### (2) DSP 硬體配置

如圖 1.15 所示，選擇 TI F28335 Target，並設定其 GPIO 接腳用途如下。本模組將用到 3 組 PWM、RS232 通訊埠、1 個 Digital Output 與 1 個 Digital Input。

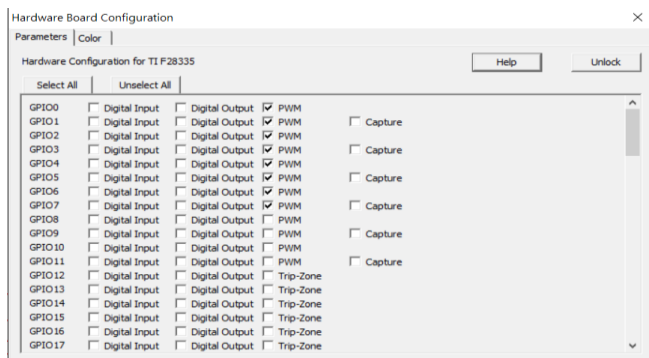
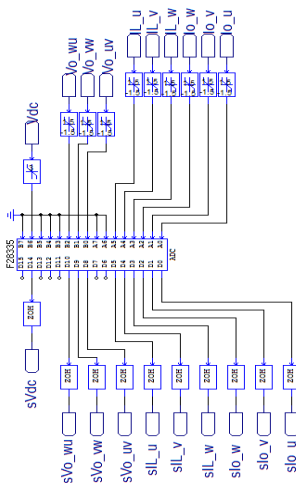


圖 1.15 TI F28335 Target 硬體配置

### (3) A/D Converter 設定

F28335 A/D Converter 分為 A、B 兩組，每組 8 通道，總計 16 通道。本實驗感測直流電壓、交流輸出電壓、逆變器輸出電流及負載電流等共計利用到其中之 10 通道，如圖 1.16(a)所示，這當中除了直流輸入電壓為直流信號外，其餘均為交流信號，A/D Converter 內部之設定如圖 1.16(b)所示。

(a)



(b)

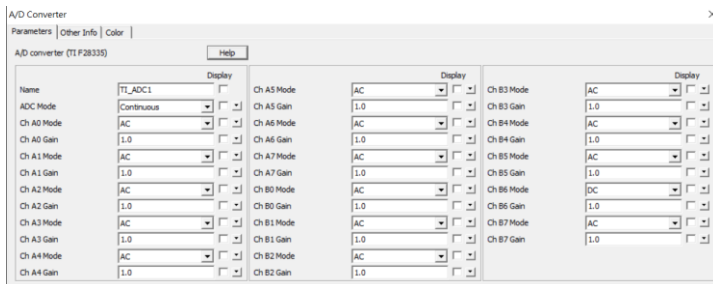


圖 1.16 DSP A/D Converter 規劃：(a)輸入信號連接圖，(b)內部設定

### (4) PWM 及其設定

PWM 程式及設定如圖 1.17(a)所示，電路包括零序均零注入及 PWM 模組，PWM 模組之設定則如圖 1.17(b)所示，其中使用上下數之三角波，其頻率為 18kHz，振幅為 -5V~+5V，空白時間為 1 $\mu$ s。

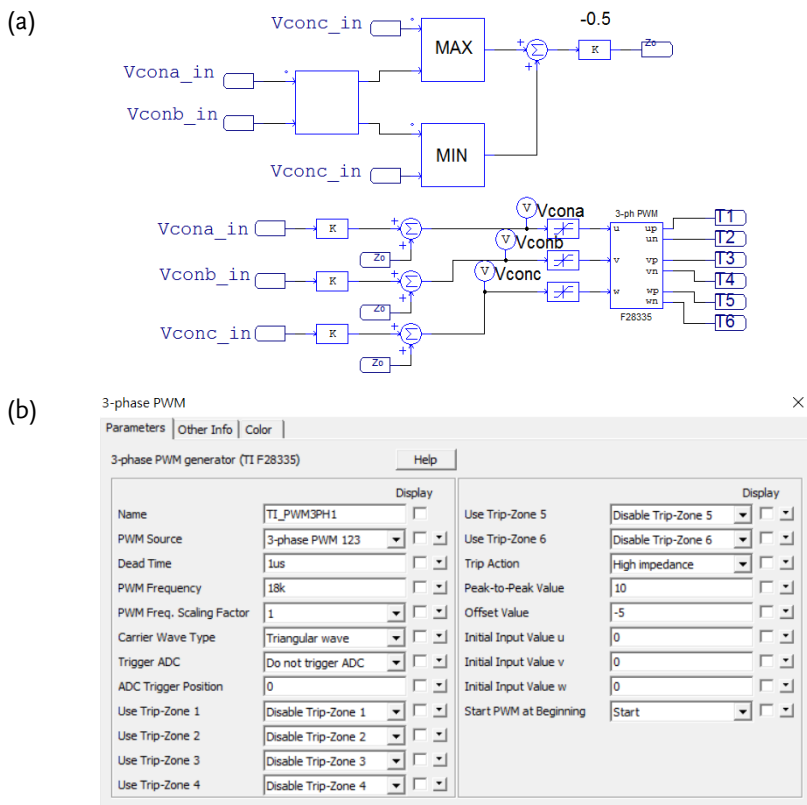


圖 1.17 PWM 程式設定：(a) 零序均零注入 PWM，(b) PWM 模組設定

### (5) 通訊設定

為了在實作過程量測 DSP 控制程式中的信號以便於確認控制器工作是否正確，PSIM 提供 RS232 之 I/O 介面，本實驗之通訊程式如圖 1.18 所示，圖 1.18(a)顯示欲藉由 SCI 觀測之訊號，圖 1.18(b)顯示 SCI 模組之設定，包括通訊埠、通訊速度、除錯及緩衝之記憶體容量等。

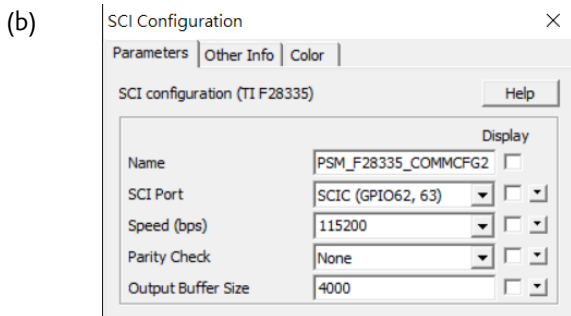
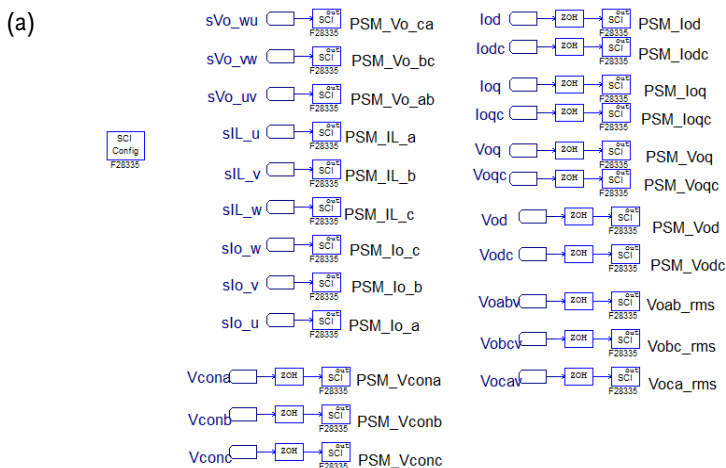


圖 1.18 通訊程式：(a)觀測信號，(b)SCI 模組設定

### (6) 模擬驗證

上述各個步驟之數位控制程式整合後亦可以進行模擬，以 SimCoder 建立之三相 SVPWM 模擬電路如圖 1.19 所示，模擬結果如圖 1.20、圖 1.21 所示，將 SPWM 轉換成 SVPWM 模擬結果如圖 1.22 所示。

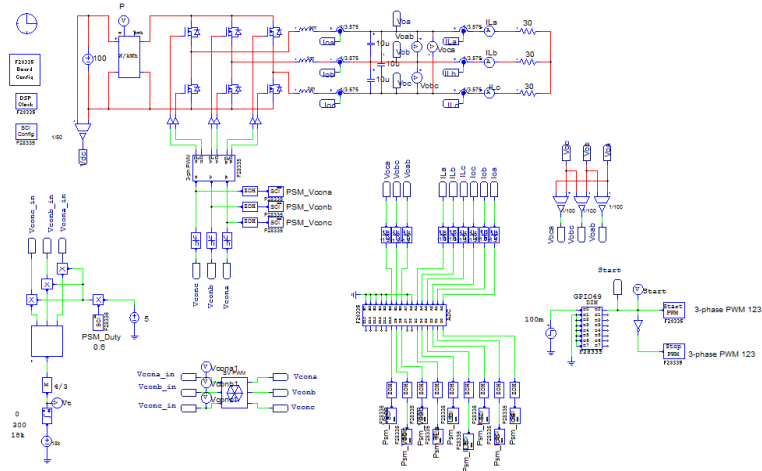


圖 1.19 以 SimCoder 建立之逆變器 SVPWM 模擬電路

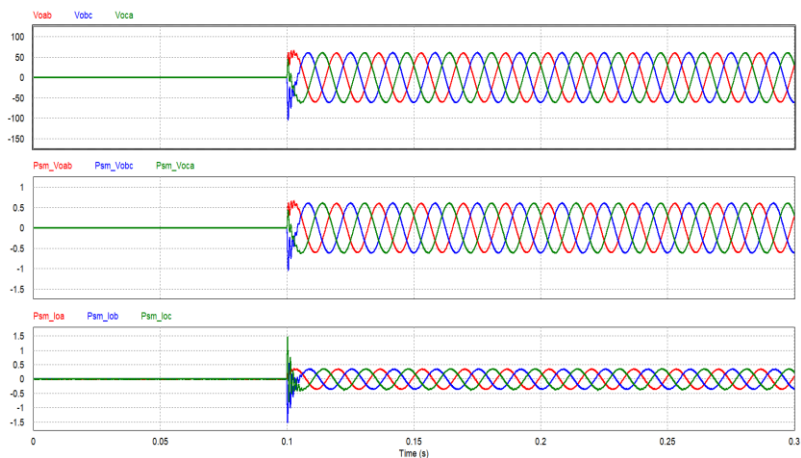


圖 1.20 以 SimCoder 建立之逆變器 SVPWM 模擬結果

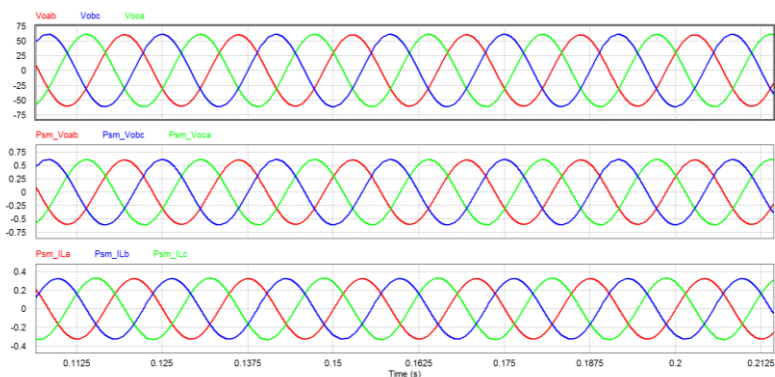


圖 1.21 SVPWM 之輸出電壓、輸出電流模擬結果

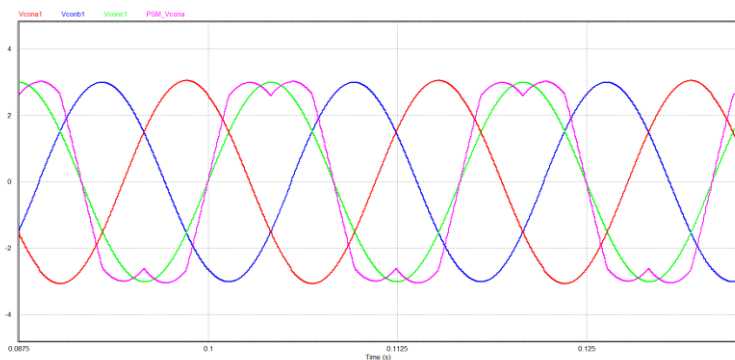


圖 1.22 SPWM 與 SVPWM 模擬結果

以 SimCoder 建立之零序注入 PWM 模擬電路圖，如圖 1.23 所示，此方法乃針對 SVPWM 計算過於複雜、較難使用之缺點所提出，模擬結果如圖 1.24、圖 1.25 所示；SPWM、零序注入 PWM 與均值零序信號模擬比較結果，如圖 1.26 所示。

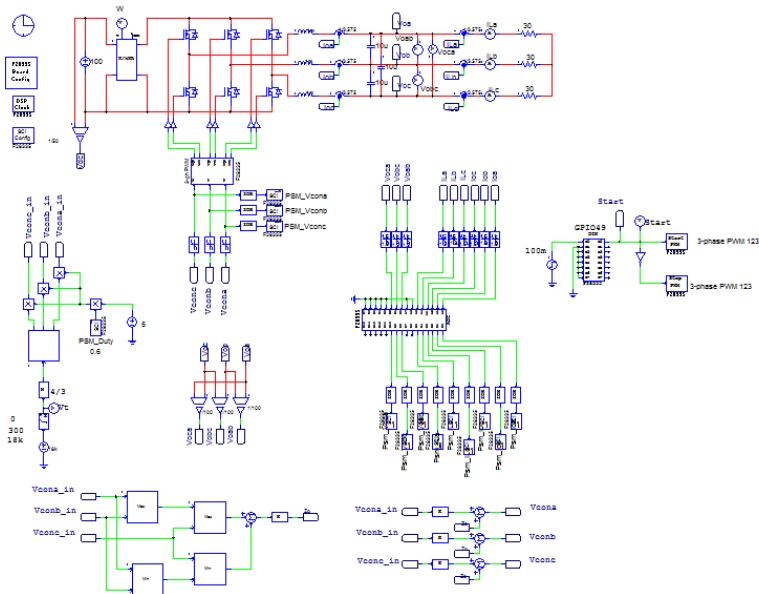


圖 1.23 以 SimCoder 建立之零序注入 PWM 模擬電路

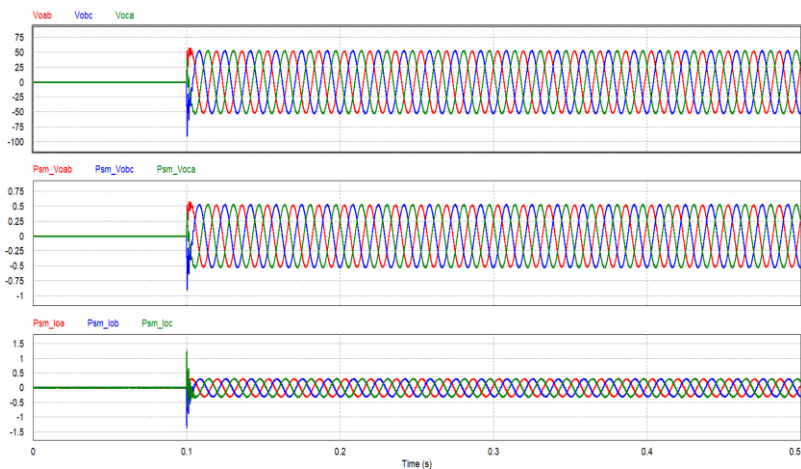


圖 1.24 以 SimCoder 建立之零序注入 PWM 模擬結果

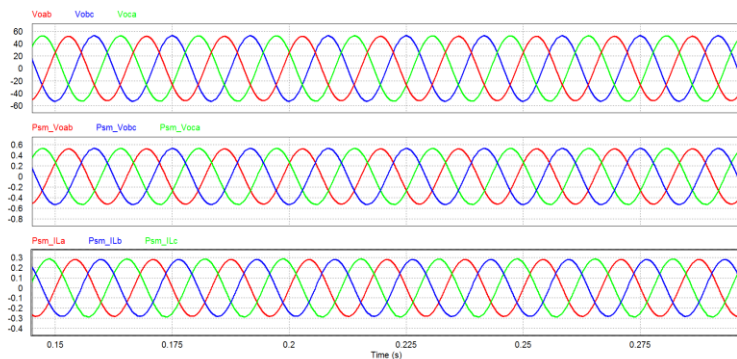


圖 1.25 零序注入 PWM 之輸出電壓、輸出電流模擬結果圖

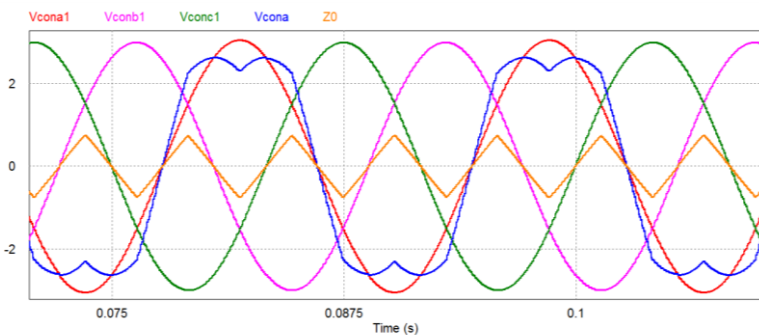


圖 1.26 SPWM、零序注入 PWM 與均值零序信號模擬比較結果

整合之程式經模擬驗證無誤後，接著可利用 PSIM 之 SimCoder 工具將控制程式轉換為 C code。



## 實驗設備

本實驗所需設備如下:

PEK-130 一台

PEK-005A 一台

PEK-006 一台

PTS-3000 一台(其中使用 GDS-2204E, PSW160-7.2, GPL-300A)

PC 一台

## 實驗步驟

實驗接線圖如圖 1.27，請依此圖完成接線。



圖 1.27 實驗—接線圖

接線完畢後，先確認 PEK-130 開關為 OFF，之後開啟 PEK-005A 的開關，開啟後 DSP 的紅色顯示燈亮起，如圖 1.28，此時表示 DSP 電源正常。

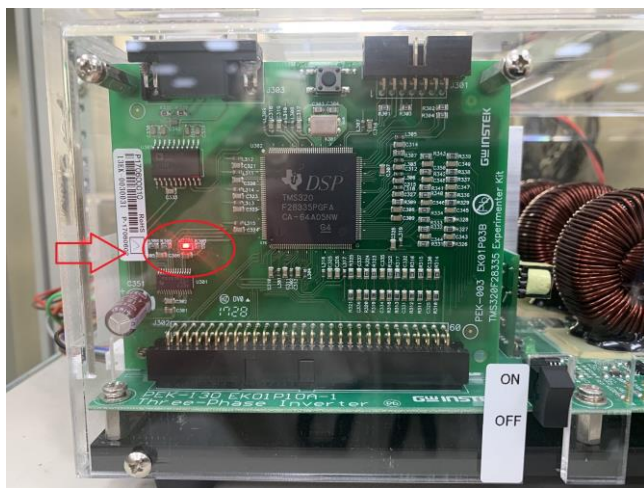


圖 1.28 DSP 正常工作畫面

將“PEK-130\_Lab1\_SVPWM\_V11.0.3.psim.sch”程式燒入 DSP 中，請依照附錄 B(燒錄流程)進行燒錄，再請依照附錄 C(RS232 連線)進行連線。

示波器探棒分別接至  $V_{o-AB}$ ,  $V_{o-BC}$ ,  $V_{o-CA}$  上，如圖 1.29

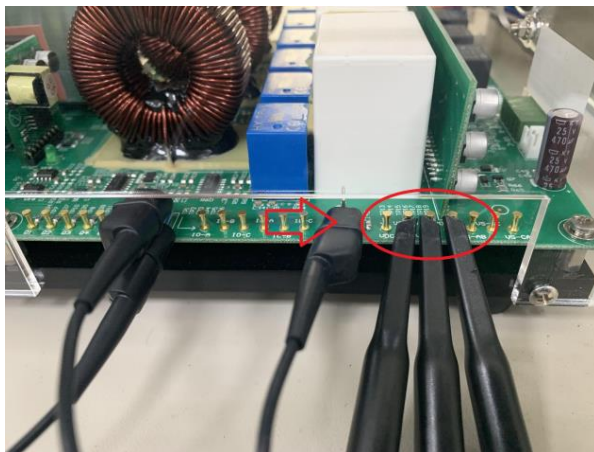


圖 1.29 示波器探棒接線圖

PSW160-7.2 設定為電壓 100V，電流 3A，GPL-300A 電源開啟後，Three Phase Load 設定為 Resistance Load，1TS,2TS 設定為 OFF，3TS 設定為 ON，此時為空載，如圖 1.30。

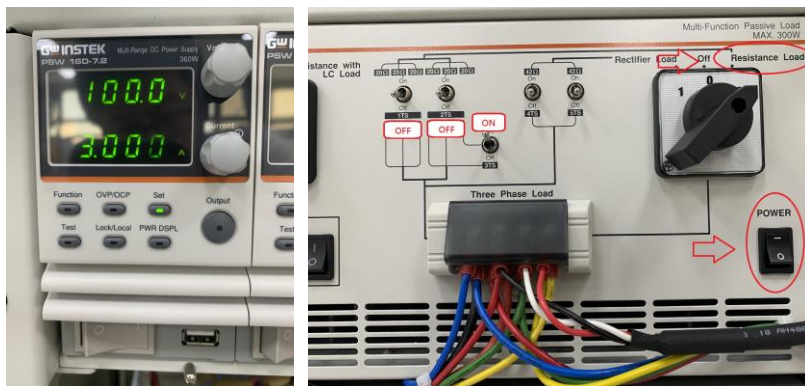


圖 1.30 PSW 160-7.2 與 GPL-300A 設定圖

設定完畢後，PSW 電源輸出後，將 PEK-130 開關開啟。

## 實驗結果

### (1) 三相 SVPWM

圖 1.31 (a) 為空載時所看到的電壓波形，圖 1.31(b) 為空載時從 RS232 回傳到電腦端看到的結果。

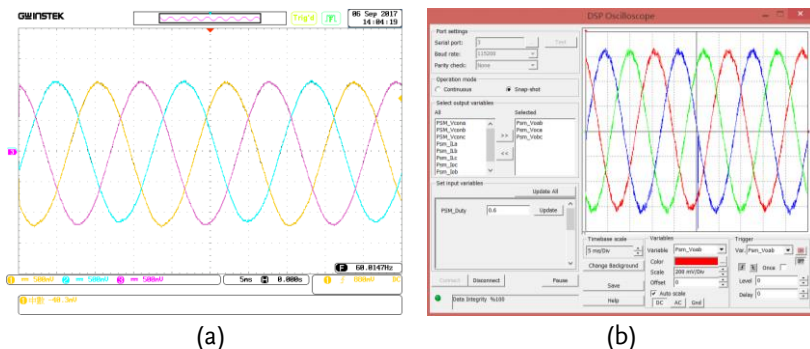
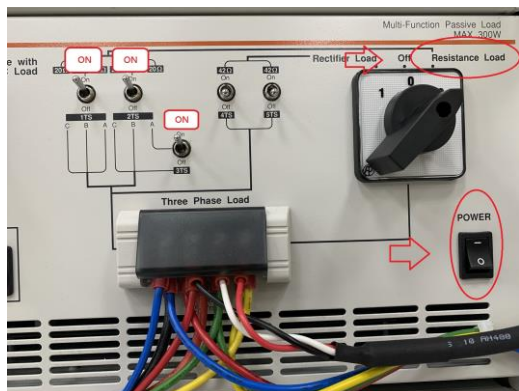


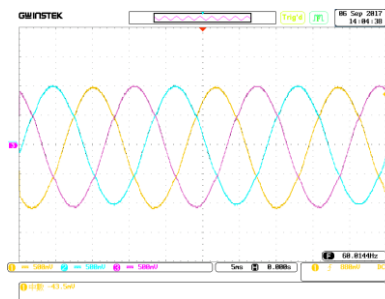
圖 1.31 (a)空載時所看到的電壓波形(b)從 RS232 回傳到電腦端看到的結果

以上為空載測試，量測加載輸出時，PSW 160-7.2 設定輸出不變，將 GPL-300A 的 1TS、2TS 與 3TS 設定為 ON，此時為滿載，如圖 1.32 所示。圖 1.33 (a) 為滿載時 Test Pin  $V_{O-AB}$ ,  $V_{O-BC}$ ,  $V_{O-CA}$  上所看到的電壓波形，圖 1.33(b) 為滿載時從 RS232 回傳到電腦端看到的結果。

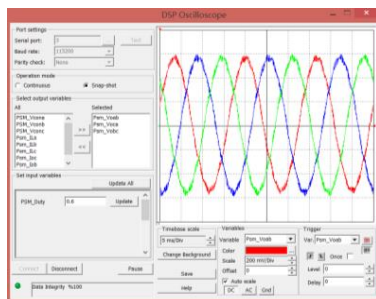
圖 1.32

GPL-300A 滿載設定





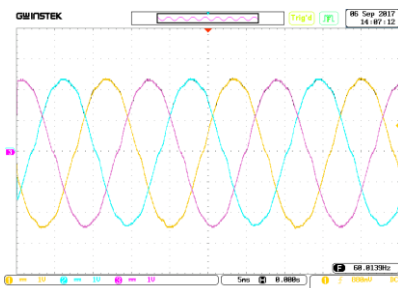
(a)



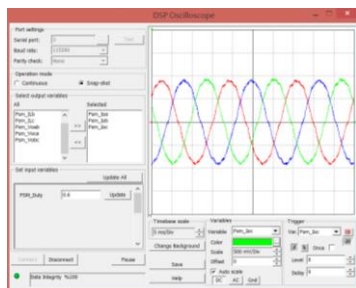
(b)

圖 1.33(a) 滿載時所看到的電壓波形 (b) 從 RS232 回傳到電腦端看到的結果圖

量測電流時，將量測探棒放置 Test Pin Io-A, Io-B, Io-C 處，圖 1.34(a) 為滿載時所看到的電流波形，圖 1.34(b) 為滿載時從 RS232 回傳到電腦端看到的結果。



(a)



(b)

圖 1.34(a) 滿載時所看到的電流波形 (b) 從 RS232 回傳到電腦端看到的結果。

實驗結束後，關閉 PEK-130 啟動鈕，再將 GPL-300A 轉至 OFF 檔，而後關閉 PSW 160-7.2。

## (2) 零序注入 PWM

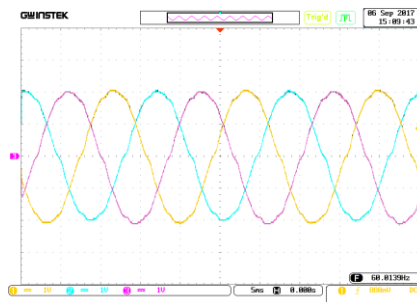
將 PSIM 程式檔改由 "PEK-130\_Lab1\_ZSVPWM\_V11.0.3.psim.sch" 取代，重複上述實驗步驟。

圖 1.35 為 SPWM、零序注入 PWM 與均值零序信號回傳到電腦端看到的結果，圖 1.36 (a) 為空載時所看到的電壓波形，圖 1.36(b) 為空載時從 RS232 回傳到電腦端看到的結果。

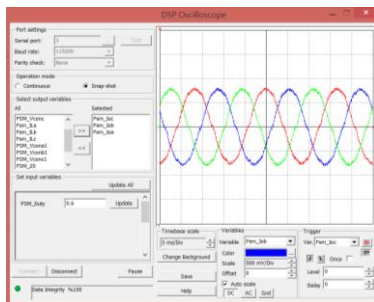


圖 1.37 (a) 為滿載時  $V_{O-AB}$ ,  $V_{O-BC}$ ,  $V_{O-CA}$  所看到的電壓波形 (b) 為滿載時從 RS232 回傳到電腦端看到的結果。

測試電流時，將測試探棒放置 Test Pin  $I_{O-A}$ ,  $I_{O-B}$ ,  $I_{O-C}$  處，圖 1.38(a) 為滿載時所看到的電流波形，圖 1.38(b) 為滿載時從 RS232 回傳到電腦端看到的結果。



(a)



(b)

圖 1.38(a) 滿載時  $I_{O-A}$ ,  $I_{O-B}$ ,  $I_{O-C}$  所看到的電流波形 (b) 從 RS232 回傳到電腦端看到的結果。

# 實驗 2 三相獨立式逆變器

## 實驗目的

學習三相逆變器之模式化方法、abc-dq 等軸轉換方法、電流迴路及電壓迴路控制器設計、RMS 電壓迴路設計、逆變器之硬體規劃及 SimCoder 程式撰寫等。

## 實驗原理

### 2.1 三相三線式逆變器之模式化與控制方法模型推導

三相三線式的逆變器電路如圖 2.1 所示，其中 n 為虛擬之電壓中性點。傳統之控制方法為採用雙迴路電感電流控制亦如圖 2.1 所示，由逆變器電路可得：

$$L \frac{dI_{oA}}{dt} = V_{AN} - V_{an} - V_{nN} \quad (2.1)$$

$$L \frac{dI_{oB}}{dt} = V_{BN} - V_{bn} - V_{nN} \quad (2.2)$$

$$L \frac{dI_{oC}}{dt} = V_{CN} - V_{cn} - V_{nN} \quad (2.3)$$

$$C \frac{dV_{an}}{dt} = I_{oA} - I_{LA} \quad (2.4)$$

$$C \frac{dV_{bn}}{dt} = I_{oB} - I_{LB} \quad (2.5)$$

$$C \frac{dV_{cn}}{dt} = I_{oC} - I_{LC} \quad (2.6)$$



由於三線式電路滿足：

$$I_{oA} + I_{oB} + I_{oC} = 0 \quad (2.7)$$

(2.1)+(2.2)+(2.3)並利用(2.7)可得：

$$V_{nN} = \frac{(V_{AN} + V_{BN} + V_{CN}) - (V_{an} + V_{bn} + V_{cn})}{3} \quad (2.8)$$

將(2.8)代回(2.1)~(2.3)可得：

$$\begin{bmatrix} L \frac{dI_{oA}}{dt} \\ L \frac{dI_{oB}}{dt} \\ L \frac{dI_{oC}}{dt} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \right) \quad (2.9)$$

$$\begin{bmatrix} I_{capa} \\ I_{capb} \\ I_{capc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \frac{dV_{an}}{dt} \\ C \frac{dV_{bn}}{dt} \\ C \frac{dV_{cn}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{oA} \\ I_{oB} \\ I_{oC} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{LA} \\ I_{LB} \\ I_{LC} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

其中 (i=A, B, C) 為 A、B 與 C 臂之輸出電壓，逆變器最常採用之切換控制方式為三相正弦式 PWM (Sinusoidal PWM, SPWM)，三相各臂使用相移 120 度的控制電壓 ( $v_{conA}$ 、 $v_{conB}$ 、 $v_{conC}$ ) 分別與三角波 ( $v_{tri}$ ) 比較以觸發三臂之開關，各臂之輸出電壓可表示如(2.11)所示：

$$V_{iN} = \left( \frac{1}{2} + \frac{V_{coni}}{2v_{tm}} \right) V_d \quad (i=A, B, C) \quad (2.11)$$

其中  $v_{tm}$  為三角波之振幅，將 (2.11) 代入(2.9)可得(2.12)：

$$\begin{bmatrix} L \frac{dI_{oA}}{dt} \\ L \frac{dI_{oB}}{dt} \\ L \frac{dI_{oC}}{dt} \end{bmatrix} = \frac{V_d}{3v_{tm}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{conA} \\ V_{conB} \\ V_{conC} \end{bmatrix} - \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

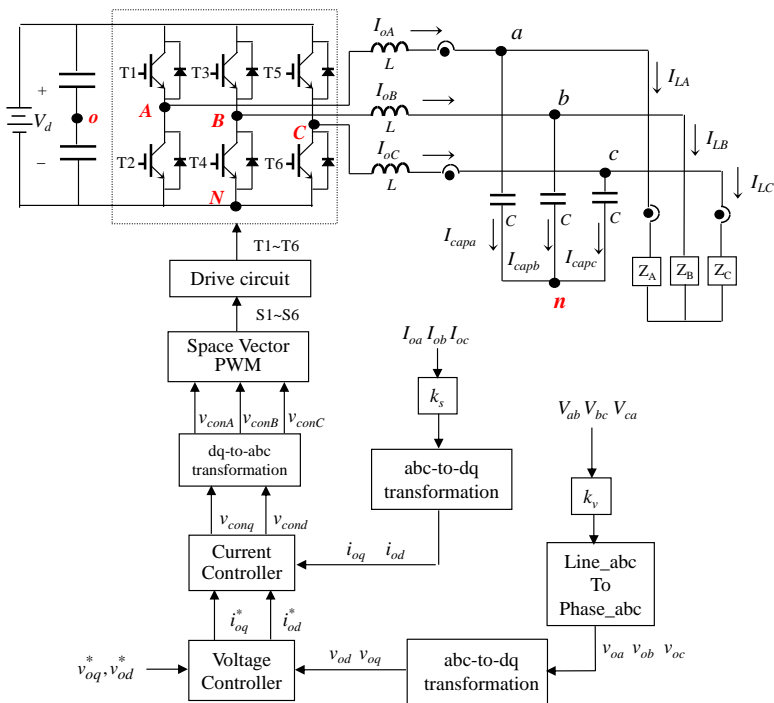


圖 2.1 三相三線式逆變器

## 2.2 軸轉換

由(2.12)所得三相 SPWM 控制電壓與各相電流之關係可知，各相電流控制不僅受該相控制電壓決定，亦受其他相控制電壓影響，亦即各相電流之控制並未解耦，因此若直接在 abc 靜止框上來設計控制器，在三相不平衡條件下，各相間將相互影響，控制之性能將受影響。為克服此問題，一般常用之方法為利用座標軸轉換方法將其數學模型予以解耦，如圖 2.2 所示之 a、b、c 三座標軸為一靜止框，可用以表示三相逆變器之相電壓及相電流等分量，而  $\alpha$ 、 $\beta$  則為兩相之靜止框，其可以將三相各差 120 度之交流量轉換為兩相各差 90 度之交流量。直、交(d、q)軸與零軸為同步旋轉座標，在三相平衡狀態下，零軸量為零，可簡化為垂直之 qd 二軸，三相 abc 靜止座標軸與兩相 dq0 同步旋轉座標軸之公式為：

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

其中

$$\theta = \omega t \quad (2.15)$$

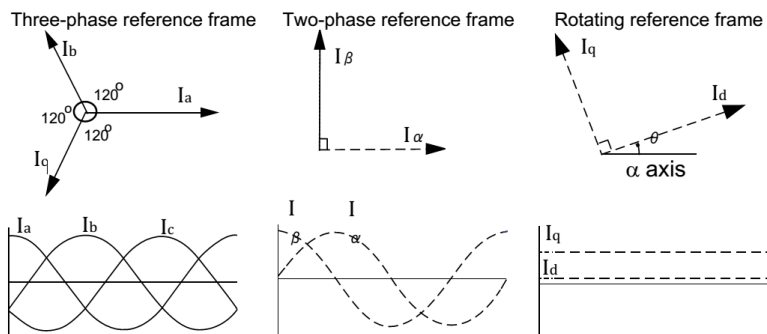


圖 2.2 各式坐標軸

利用(2.13)及(2.14)之軸轉換公式代入(2.10)、(2.12)可以推出圖 2.1 三相三線式逆變器之狀態方程為：

$$\begin{bmatrix} L \frac{dI_{od}}{dt} \\ L \frac{dI_{oq}}{dt} \\ L \frac{dI_{o0}}{dt} \end{bmatrix} = \frac{V_d}{2V_{tm}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{cond} \\ V_{conq} \\ V_{con0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{od} \\ V_{oq} \\ V_{o0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & \omega L & 0 \\ -\omega L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{od} \\ I_{oq} \\ I_{o0} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$\begin{bmatrix} C \frac{dV_{od}}{dt} \\ C \frac{dV_{oq}}{dt} \\ C \frac{dV_{o0}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{od} \\ I_{oq} \\ I_{o0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{od} \\ I_{oq} \\ I_{o0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & \omega C & 0 \\ -\omega C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{od} \\ V_{oq} \\ V_{o0} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

其中  $V_{con}(i=d, q)$  為  $dq$  軸 PWM 之控制電壓， $V_{tm}$  為 PWM 三角波之振幅。

在進行上述  $abc-dq$  軸轉換之前，由於三相三線電路的電壓偵測電路所偵測到的電壓為線電壓 ( $V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}$ )，因此需利用以下線電壓對相電壓 (Line- $abc$  to Phase- $abc$ ) 之轉換以獲得(2.12)中之  $V_{an}$ 、 $V_{bn}$  及  $V_{cn}$  等虛擬相電壓：

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

### 2.3 電流控制器設計

利用(2.16)可以設計逆變器之電流控制器如圖 2.3 所示，其中  $d$ 、 $q$  軸之電流均會對另一軸產生擾動，因此圖 2.3 乃藉由前向控制信號  $v_{ff2}$  用以消除此擾動。而另一前向控制信號  $v_{ff1}$  則用以消除該相輸出電壓對電流迴路之擾動。 $k_v$  及  $k_s$  分別為電壓及電流之感測增益，電流誤差放大器  $G_I$  可採用  $P$ 、 $PI$  或二類誤差放大器來設計，若採用  $P$  控制 ( $G_I=k_I$ )，則電流迴路之響應可由電流迴授迴路求得為：

$$\frac{i_{o,i}^*}{i_{o,i}} = \frac{k_{pwm}k_s k_1}{s + \frac{k_{pwm}k_s k_1}{L}} = \frac{u_I}{s + u_I}, i = d, q \quad (2.19)$$

此處  $u_I$  即為電流迴路之頻寬：

$$u_I = \frac{k_{pwm} k_s k_1}{L} \quad (2.20)$$

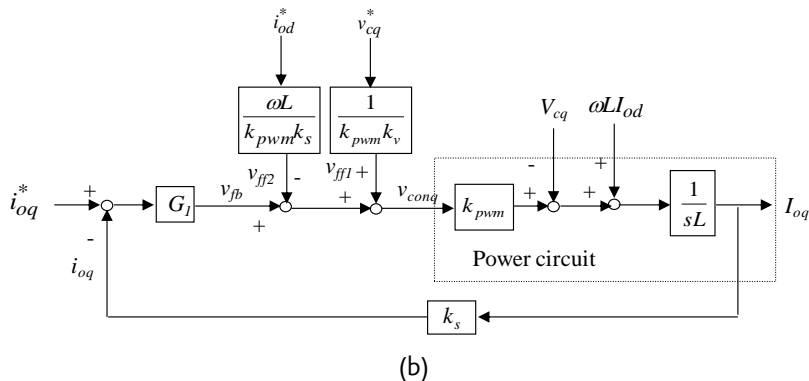
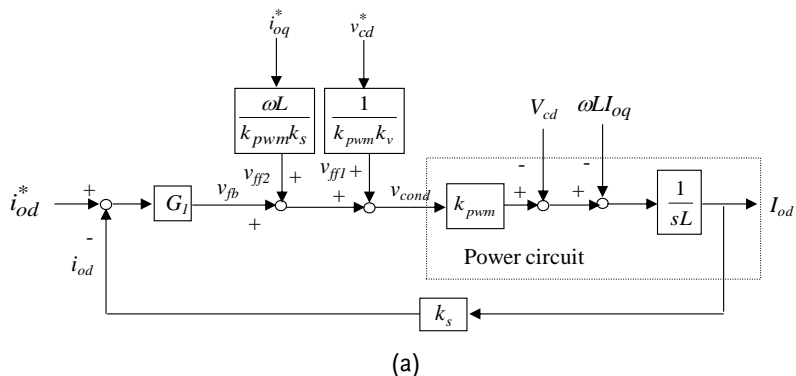
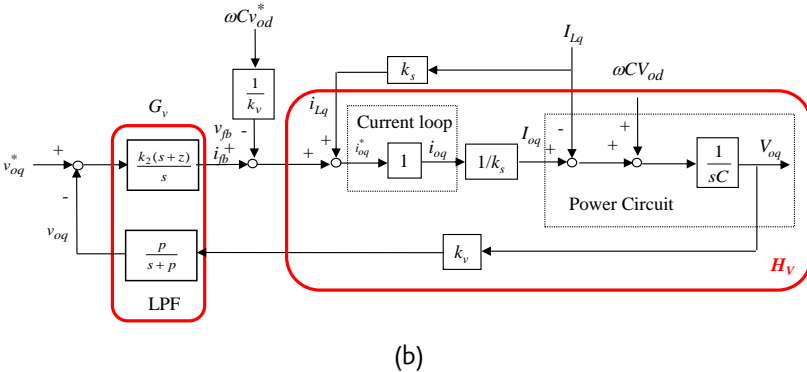
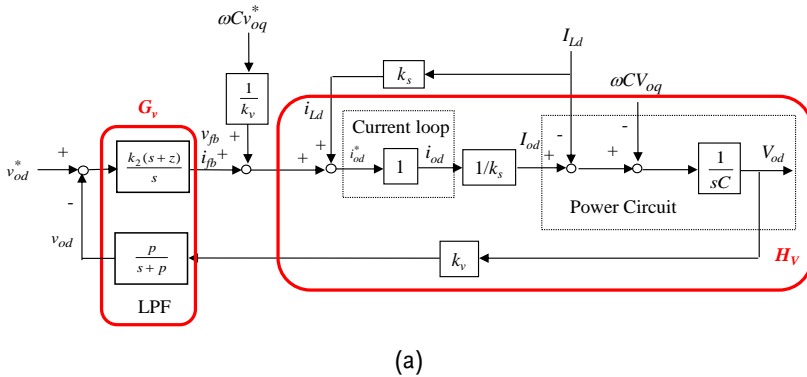


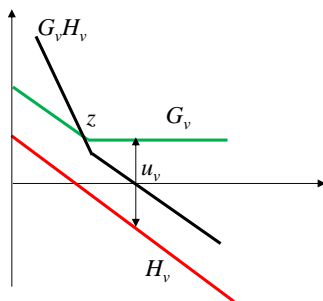
圖 2.3 逆變器之電流控制迴路：(a)d 軸，(b)q 軸

## 2.4 電壓控制器

逆變器之電壓迴路控制方塊圖如圖 2.4 所示，其中之電力電路方塊乃利用(2.17)所繪。此外假設電流迴路響應之頻寬( $u_I$ )要較電壓迴路頻寬高四倍以上，則電流迴路之響應(2.19)在分析電壓迴路響應時可以被視為 1。電壓控制器亦採用前向控制與回授控制並用，由於有感測負載電流，因此逆變控制器利用感測之負載電流加入電流命令中用以直接消除負載電流對於電壓迴路之擾動，另外亦利用電壓命令( $v_{od}^*$ 及

$v_{oq}^*$ ) 乘上  $\omega C$  並加入其他軸之電流命令以消除電容電流 ( $\omega C V_{od}$  及  $\omega C V_{oq}$ ) 之擾動。而電壓回授控制器  $G_v$  則為二類誤差放大器，其乃由一回授比例積分控制器與一電壓回授信號之低通濾波器 (LPF) 所組成。電壓迴路波德圖如圖 2.3(c) 所示，一般將電壓迴路之頻寬置於電流迴路頻寬之 1/4。為了獲致良好之電壓調整率，且在三相負載不平衡下亦能獲致三相電壓平衡，各個線電壓必須能夠個別調整其 RMS 值。圖 2.5 為電壓均方根值控制器，其個別計算三輸出線電壓之均方根值 ( $v_{abm}, v_{bcm}, v_{cam}$ )，再與均方根值的命令  $v_{cm}^*$  比較及經過  $G_m$  調整後產生一振幅修正信號 ( $A_{m1}, A_{m2}, A_{m3}$ ) 用以修正原來線電壓的振幅命令  $A_{m0}$ ，得到最終之線電壓振幅命令  $A_{mab}, A_{mbc}, A_{mca}$  等，其再與經過 30 度相對於虛擬相電壓相移之三相正弦波  $\sin(\omega t + \pi/6)$ 、 $\sin(\omega t - \pi/2)$ 、 $\sin(\omega t + 5\pi/6)$  等相乘後得到三相線電壓之瞬時電壓命令，最後再經由 Line-abc 到 Phase-abc 轉換及 abc-dq 轉換得到最終電壓迴路之命令  $v_{od}^*$  及  $v_{oq}^*$ 。





(c)

圖 2.4 逆變器之電壓控制迴路：(a)d 軸，(b)q 軸，(c)電壓迴路波德圖

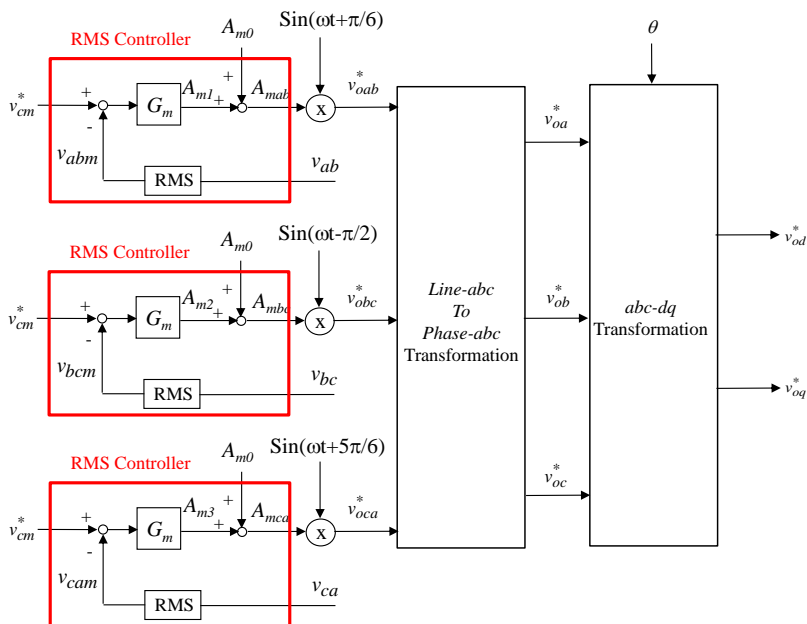


圖 2.5 電壓均方根值控制器

## 電路模擬

將以如下規格 250W 之逆變器來驗證上述各式控制方法：

### 逆變器規格

- $R_a/R_b/R_c = 20 \text{ ohm}$ ，不平衡負載  $R_a/R_b/R_c = 20/10/10 \text{ ohm}$
- DC Voltage  $V_d = 100\text{V}$ ，AC Voltage  $V_{LL} = 50V_{\text{rms}}$
- $F_s = 18\text{kHz}$ ， $V_{\text{tri}} = 10\text{Vpp}$  (PWM)， $C_d = 330\mu\text{F}$ ， $L = 1\text{mH}$ ， $C = 10\mu\text{F}$
- $K_s = 0.3$  (current sensing factor)
- $K_v = 0.01$  (AC voltage sensing factor)
- $K_v = 0.02$  (DC voltage sensing factor)

### PSIM 模擬

根據上述參數所建制之模擬電路如圖 2.6 所示，在線性平衡負載下之模擬結果如圖 2.7、2.8 所示，將負載調整為不平衡負載  $R_a/R_b/R_c = 20/10/10 \text{ ohm}$  如圖 2.9 所示，在線性不平衡負載下之模擬結果如圖 2.10、2.11 所示，其顯示在負載不平衡下 dq 軸電流均含有二次漣波，電壓及電流均能緊密追隨其命令。







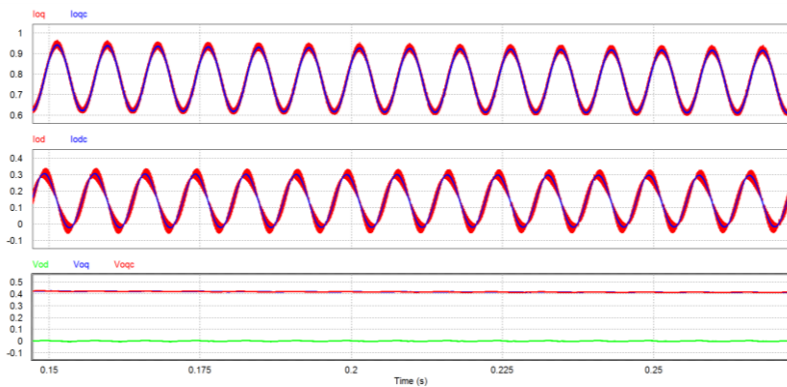


圖 2.10 不平衡負載控制迴路之電壓及電流追蹤波形模擬結果

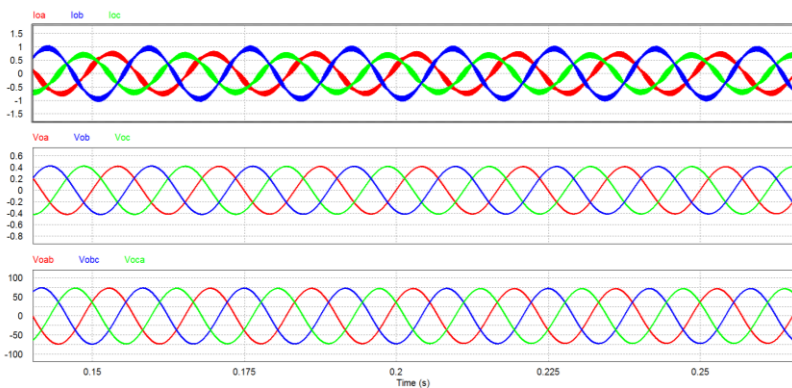


圖 2.11 不平衡負載輸出電壓、輸出電流模擬結果

## SimCoder 程式規劃及電路模擬

以 SimCoder 建立之三相逆變器 Stand-alone 模擬電路如圖 2.12 所示，在線性平衡負載模擬結果如圖 2.13、圖 2.14 所示，圖 2.15 為以 SimCoder 建立之三相逆變器 Stand-alone 不平衡負載模擬電路，在線性不平衡負載下之模擬結果如圖 2.16、2.17 所示。

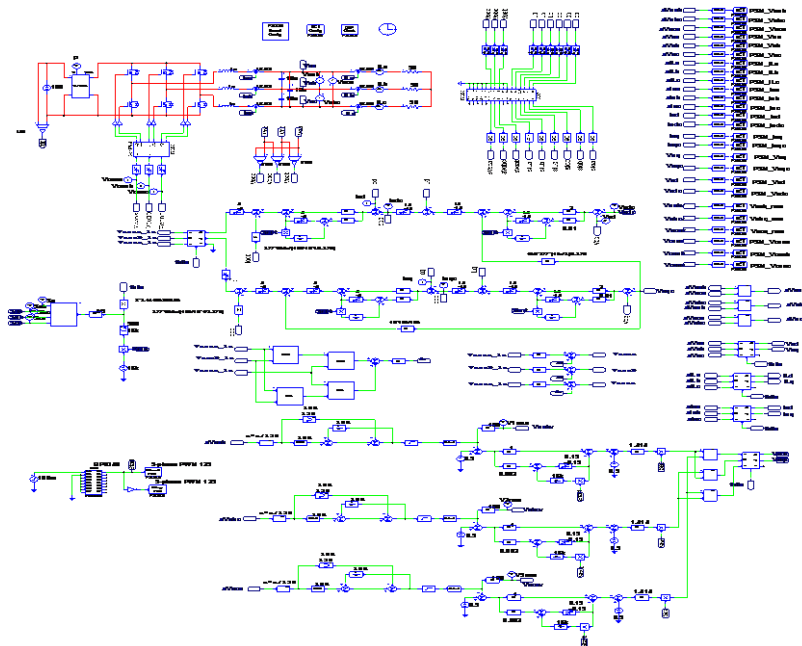


圖 2.12 以 SimCoder 建立之三相逆變器 Stand-alone 模擬電路

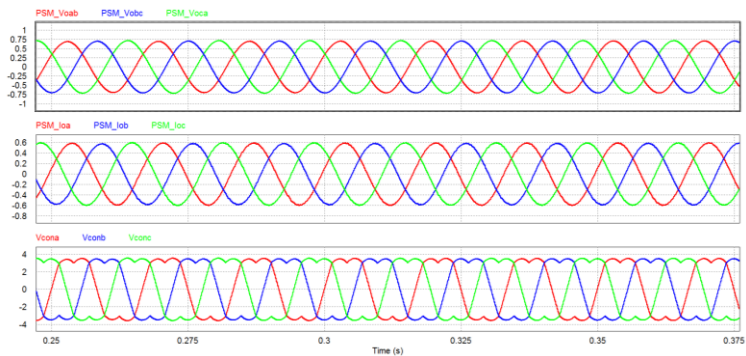


圖 2.13 以 SimCoder 建立之三相逆變器 Stand-alone 模擬結果

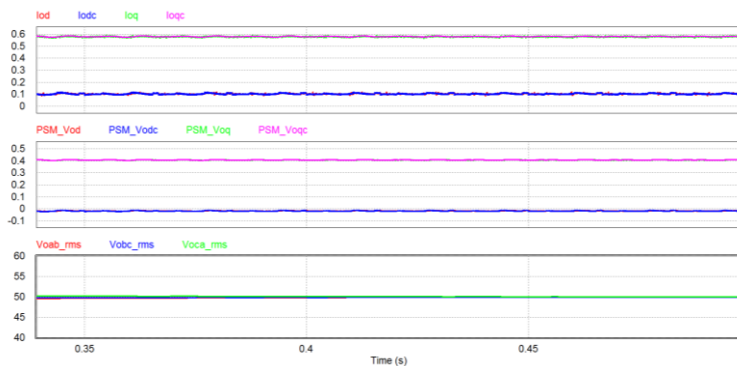


圖 2.14 以 SimCoder 建立之三相逆變器 Stand-alone 之 D 軸、Q 軸模擬結果



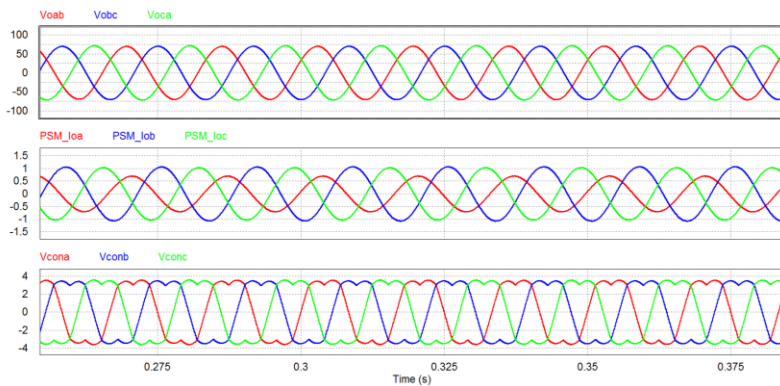


圖 2.16 不平衡負載之輸出電壓、輸出電流及  $V_{con}$  模擬結果

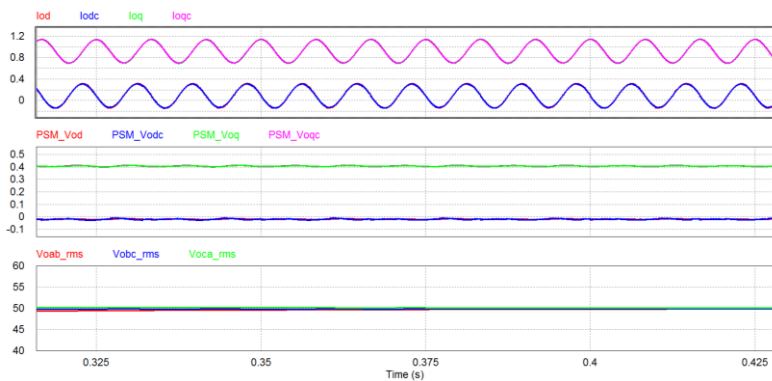


圖 2.17 不平衡負載 RMS 值與電壓、電流之 D 軸 Q 軸模擬結果

## 實驗設備

本實驗所需設備如下:

PEK-130 一台

PEK-005A 一台

PEK-006 一台

PTS-3000 一台(其中使用 GDS-2204E, PSW160-7.2, GPL-300A)

PC 一台



## 實驗步驟

實驗接線圖如圖 2.18，請依此圖完成接線。

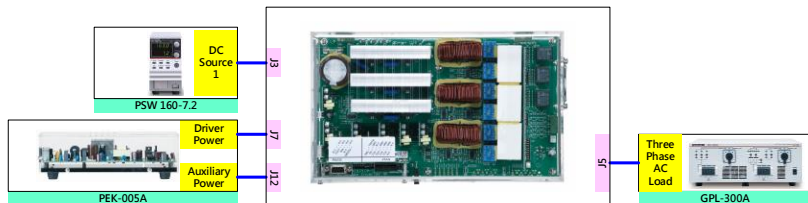


圖 2.18 實驗二接線圖

接線完畢後，先確認 PEK-130 開關為 OFF，之後開啟 PEK-005A 的開關，開啟後 DSP 的紅色顯示燈亮起，如圖 2.19，此時表示 DSP 電源正常。



圖 2.19 DSP 正常工作畫面

將“PEK-130\_Lab2\_V11.0.3”程式燒入 DSP 中，請依照附錄 B(燒錄流程)進行燒錄，再請依照附錄 C(RS232 連線)進行連線。

將示波器探棒分別接至 Vo-AB, Vo-BC, Vo-CA 上，如圖 2.20

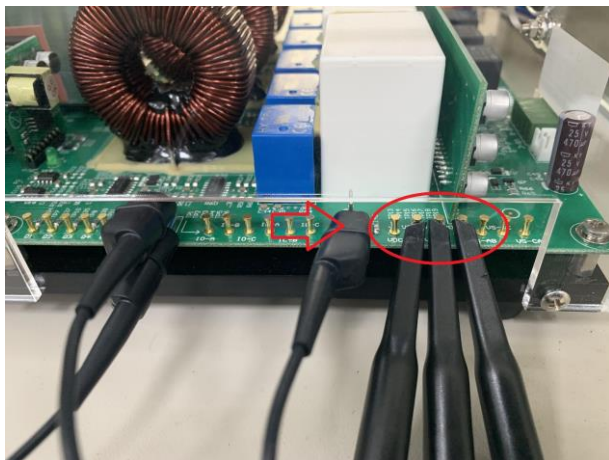


圖 2.20 示波器探棒接線圖

PSW160-7.2 設定為電壓 100V，電流 3A，GPL-300A 電源開啟後，Three Phase Load 設定為 Resistance Load，1TS,2TS 設定為 OFF，3TS 設定為 ON，此時為空載，如圖 2.21。

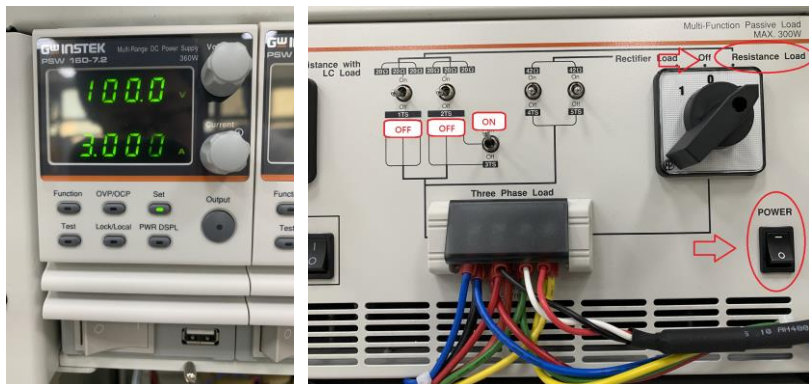


圖 2.21 PSW 160-7.2 與 GPL-300A 設定圖

設定完畢後，PSW 電源輸出後，將 PEK-130 開關開啟。

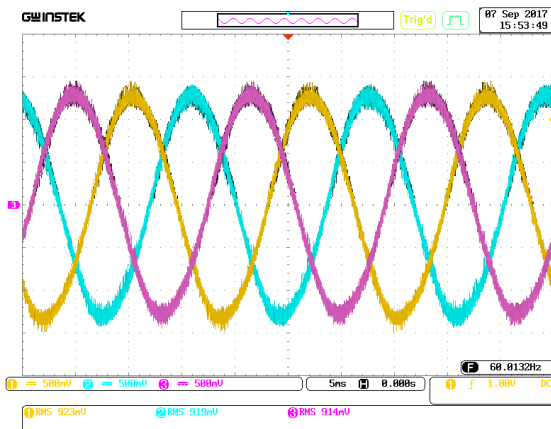
## 實驗結果

### (1) 三相逆變器 Stand-alone 線性平衡負載

圖 2.22 為空載時所看到的電壓波形。

圖 2.22

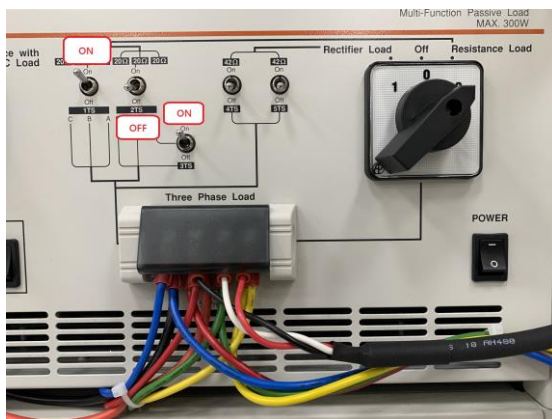
空載時所看到的電壓波形

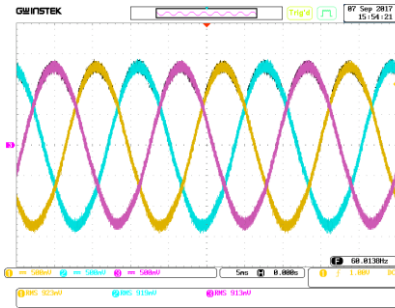


以上為空載測試，量測加載輸出時，PSW 160-7.2 設定輸出不變，將 GPL-300A 的 1TS 與 3TS 設定為 ON，2TS 設定為 OFF，此時為半載，如圖 2.23 所示。圖 2.24 (a)為半載時 Test Pin  $V_{O-AB}$ ,  $V_{O-BC}$ ,  $V_{O-CA}$  上所看到的電壓波形，2.24(b)為半載時從 RS232 回傳到電腦端看到的結果。

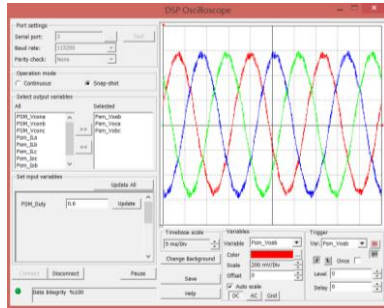
圖 2.23

GPL-300A 半載設定





(a)



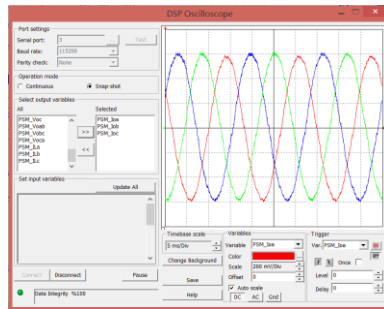
(b)

圖 2.24(a) 半載時電壓輸出波形(b)從 RS232 回傳到電腦端的結果圖

測試輸出電流時，將測試探棒放置 Test Pin I<sub>O-A</sub>, I<sub>O-B</sub>, I<sub>O-C</sub> 處，圖 2.25(a)為半載時所看到的電流波形，圖 2.25(b)為半載時從 RS232 回傳到電腦端看到的結果。



(a)



(b)

圖 2.25(a) 半載時電流輸出波形 (b)從 RS232 回傳到電腦端的結果。

同時可透過 PSIM 的 DSP 示波器做控制信號的即時觀測，圖 2.26 顯示為控制迴路 dq 軸電壓命令及追蹤，圖 2.27 顯示為控制迴路 dq 軸電流追蹤，圖 2.28 顯示為三相控制命令，圖 2.29 三相線電壓均方根值

圖 2.26  
dq 軸電壓追蹤

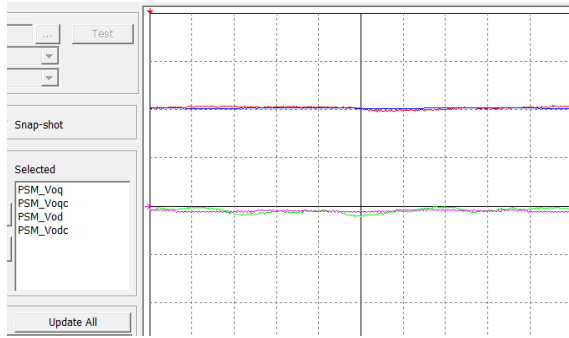


圖 2.27  
dq 軸電流追蹤

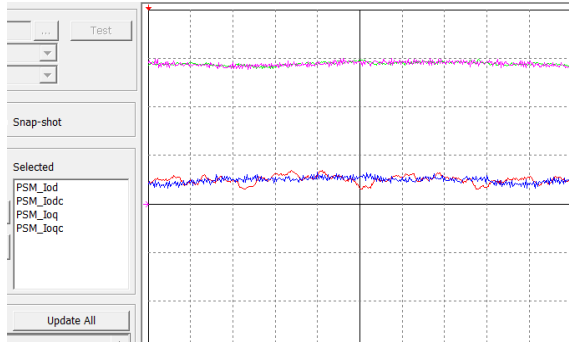


圖 2.28  
三相開關控制命令

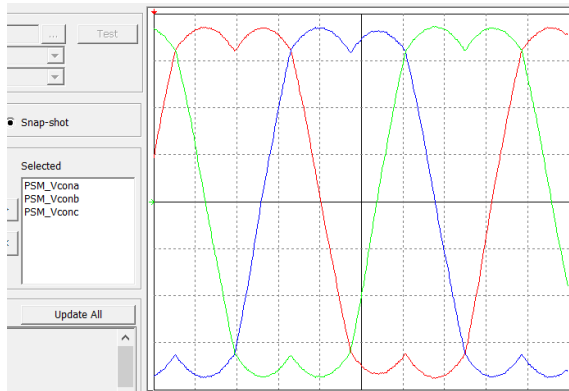
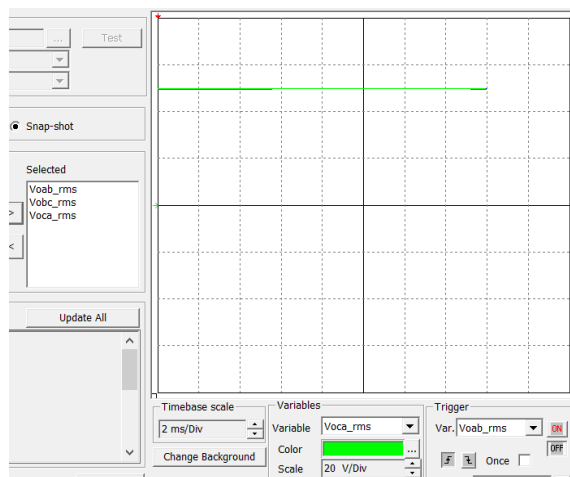


圖 2.29

三相線電壓均方根值(20V/div)



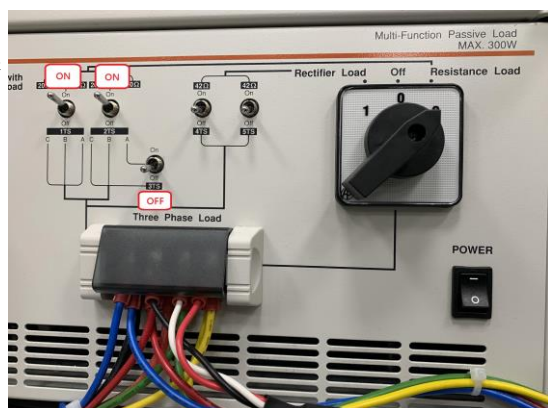
實驗結束後，關閉 PEK-130 啟動鈕。

## (2) 三相逆變器 Stand-alone 線性不平衡負載

接續上個實驗，量測不平衡負載輸出時，GPL-300A 的負載調整至不平衡負載( $R_a/R_b/R_c = 20/10/10 \text{ ohm}$ )，如圖 2.30 所示，再接著開啟 PEK-130 啟動鈕，將測試探棒放置 Test Pin  $V_{O-AB}$ ,  $V_{O-BC}$ ,  $V_{O-CA}$  處。圖 2.31 (a)為不平衡負載時 Test Pin  $V_{O-AB}$ ,  $V_{O-BC}$ ,  $V_{O-CA}$  上所看到的電壓波形，圖 2.31(b)從 RS232 回傳到電腦端看到的結果。

圖 2.30

GPL-300A 不平衡負載設定



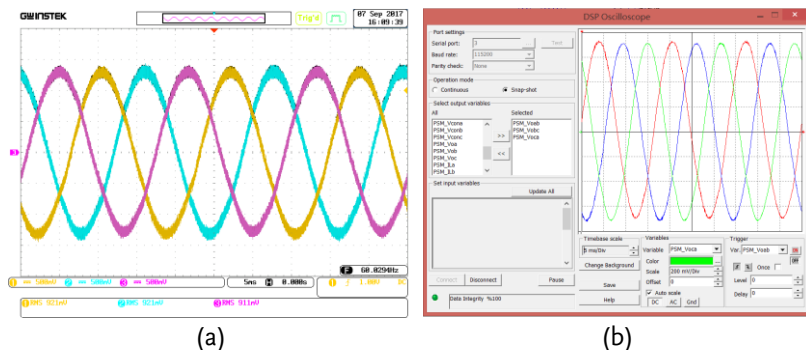


圖 2.31 (a) 不平衡負載電壓輸出波形 (b)從 RS232 回傳到電腦端的結果。

測試輸出電流時，將測試探棒放置 Test Pin I<sub>0-A</sub>, I<sub>0-B</sub>, I<sub>0-C</sub> 處，圖 2.32(a)為不平衡負載的電流輸出波形，圖 2.32(b)為從 RS232 回傳到電腦端看到的結果。

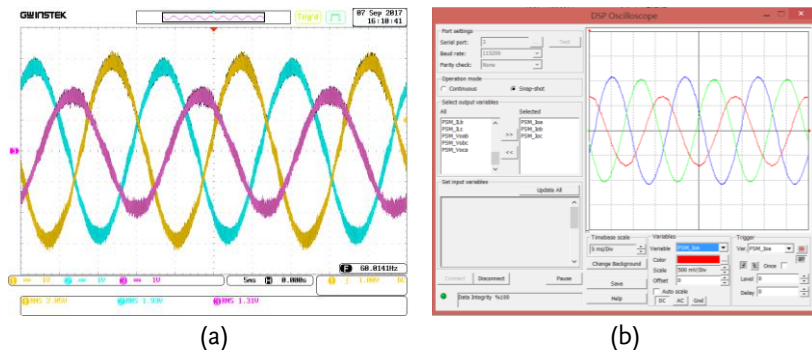


圖 2.32 (a) 不平衡負載電流輸出波形 (b)從 RS232 回傳到電腦端的結果。

透過 PSIM 的 DSP 示波器做控制信號的即時觀測，圖 2.33 顯示為控制迴路 dq 軸電壓命令及追蹤，圖 2.34 顯示為控制迴路 dq 軸電流追蹤，圖 2.35 三相線電壓均方根值，圖 2.36 顯示為三相控制命令。

圖 2.33  
不平衡負載時 dq  
軸電壓追蹤

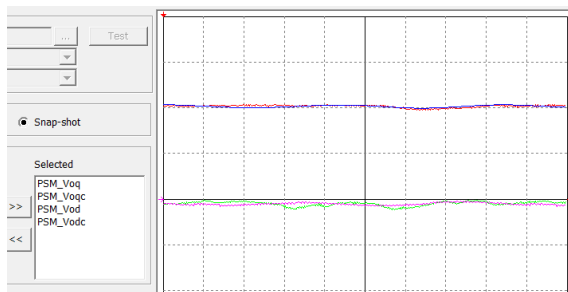


圖 2.34  
不平衡負載時 dq  
軸電流追蹤

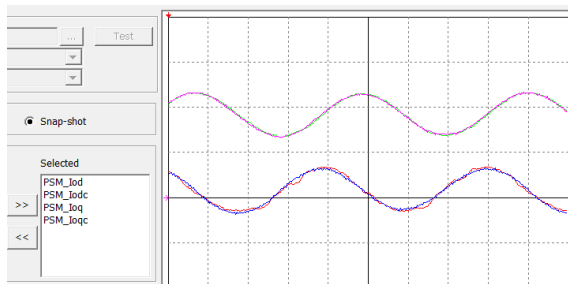


圖 2.35  
三相線電壓均方  
根值(20V/div)

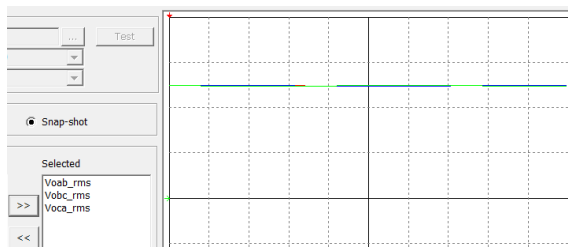
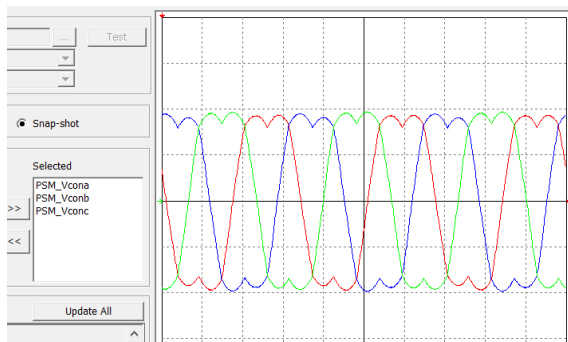


圖 2.36  
三相開關控制命  
令



實驗結束後，關閉 PEK-130 啟動鈕，而後關閉 PSW 160-7.2，再將 GPL-300A 轉至 OFF 檔。



# 實驗 3 三相並網逆變器

## 實驗目的

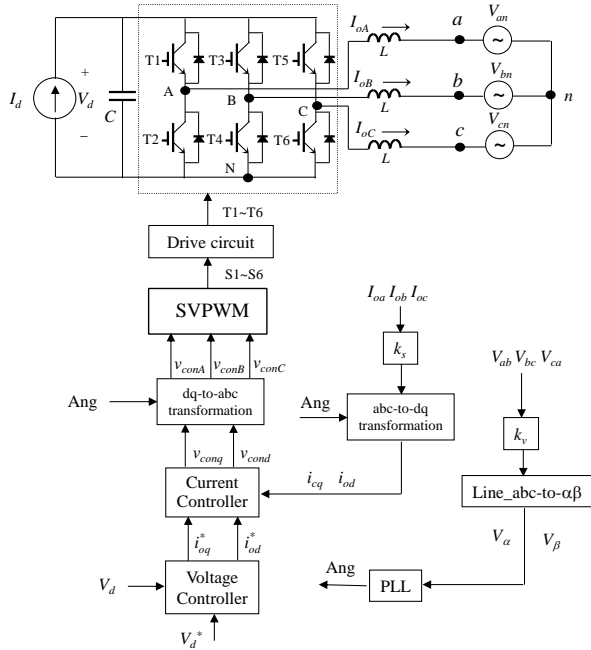
學習三相市電並聯原理、鎖相迴路方法、電流迴路及電壓迴路控制器設計、硬體規劃及並網之 SimCoder 程式撰寫等。

## 實驗原理

### 3.1 簡介

三相市電並聯逆變器為許多再生能源發電系統、儲能系統等與電網介面所必須，此系統可能包含多級電路，本實驗著重市電並聯逆變器之控制，因此電路架構簡化如圖 3.1 所示僅顯示逆變器部分，其中輸入之電流  $I_d$ ，乃用以表示前一級電路所產生之電流。逆變器採用雙迴路控制，外迴路為直流電壓控制迴路，內迴路則為電感電流控制迴路，此外逆變器並網的電流需與市電電壓同步，因此尚需一鎖相迴路 (Phase Lock Loop, PLL) 控制。

圖 3.1  
三相市電並聯逆  
變器控制架構



### 3.2 電流迴路設計

三相市電並聯逆變器的等效電路模型與前述 Lab 2 獨立式逆變器之模型相同，可以藉由  $abc$ - $dq$  軸轉換將電路轉換至同步旋轉框以簡化控制器之設計，在  $dq$  軸下逆變器之電流控制器如圖 3.2 所示，其中  $d$ 、 $q$  軸之電流均會對另一軸之電流迴路產生擾動，因此圖 3.2 乃藉由前向控制信號  $v_{ff2}$  用以消除此擾動。而另一前向控制信號  $v_{ff1}$  則用以消除該相輸出電壓對電流迴路之擾動。 $k_v$  及  $k_s$  分別為電壓及電流之感測增益，電流誤差放大器  $G_I$  可採用  $P$ 、 $PI$  或二類誤差放大器來設計，若採用  $P$  控制( $G_I=k_1$ )，則電流迴路之響應可由電流迴授迴路求得為：

$$\frac{i_{o,i}^*}{i_{o,i}} = \frac{k_{pwm}k_s k_1}{s + \frac{k_{pwm}k_s k_1}{L}} = \frac{u_I}{s + u_I}, i = d, q \quad (3.1)$$

此處  $u_I$  即為電流迴路之頻寬：

$$u_I = \frac{k_{pwm}k_s k_1}{L} \tag{3.2}$$

其可以利用電流誤差放大器之增益  $k_1$  加以設計。

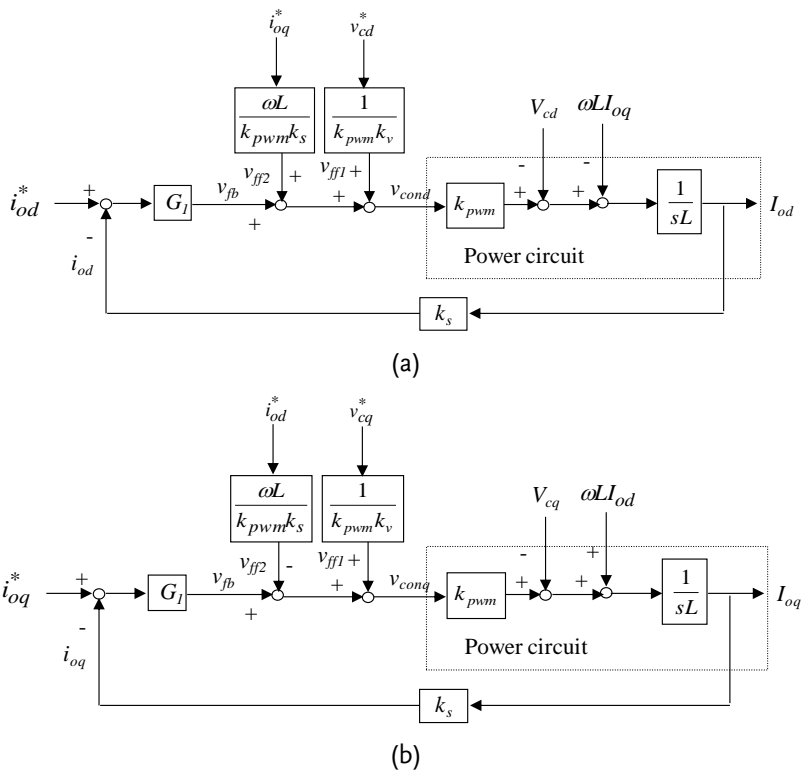


圖 3.2 逆變器之電流控制迴路：(a)d 軸，(b)q 軸

### 3.3 電壓迴路設計

直流電壓控制的目的是在維持功率平衡，亦即前級電路傳送過來的功率可與逆變器饋入市電之功率平衡。因此去除穩態之直流工作點後，電壓迴路之等效小信號電路模型可表示如圖 3.3 (a)所示，亦即逆變器可視為一電流源  $I_d$  的小信號值對直流電容充電。

交流側之瞬時功率可表示為：

$$P_{ac} = V_{\alpha} I_{\alpha} + V_{\beta} I_{\beta} = V_{s(p)} \sin \omega t \cdot I_m \sin \omega t + V_{s(p)} \cos \omega t \cdot I_m \cos \omega t \quad (3.3)$$

其中  $V_{s(p)}$  為  $dq$  軸峰值電壓， $I_m$  為  $dq$  軸峰值電流。利用三角函數關係上式可簡化為：

$$P_{ac} = V_{s(p)} I_m \quad (3.4)$$

將電流源反應至直流側如圖 3.3(b)，假設逆變器效率為 100%，此時輸入功率  $P_{ac}$  等於輸出功率  $P_{dc}$ ：

$$P_{dc} = P_{ac} \quad (3.5)$$

又直流側功率可表示為：

$$P_{dc} = V_d I_d \quad (3.6)$$

因此

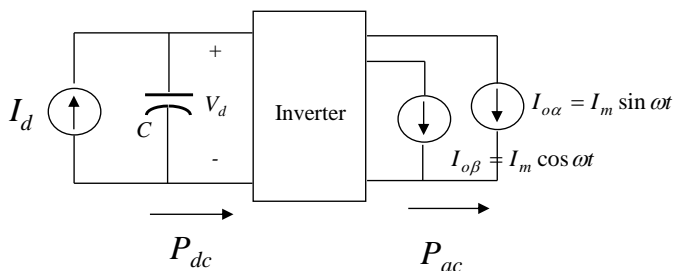
$$V_d I_d = V_{s(p)} I_m \quad (3.7)$$

$$I_d = \frac{V_{s(p)} I_m}{V_d} = K_{dc} I_m \quad (3.8)$$

$$\tilde{V}_d = \tilde{I}_d \frac{1}{sC} \quad (3.9)$$

由圖 3.3(b) 可得直流側電流源對直流電壓之轉移函數如下：

$$\frac{\tilde{V}_d}{\tilde{I}_m} = \frac{K_{dc}}{sC}, \quad K_{dc} = \frac{V_{s(p)}}{V_d} \quad (3.10)$$



(a)

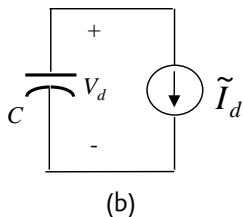


圖 3.3 電壓迴路：(a)dq 軸等效電路，(b)轉換至直流側等效電路

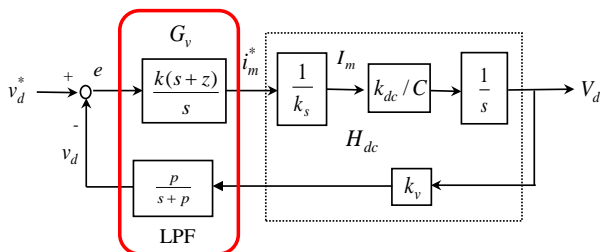
### 直流電壓迴路控制器設計

根據(3.8)，可設計直流電壓控制方塊圖如圖 3.4，其中  $k_v$  及  $k_s$  分別為電壓及電流之感測增益，將感測增益與(3.10)結合可得(3.11)：

$$H_{dc}(s) = \frac{k_v k_{dc}}{k_s C s} \quad (3.11)$$

圖 3.4

電壓迴路之控制方塊圖



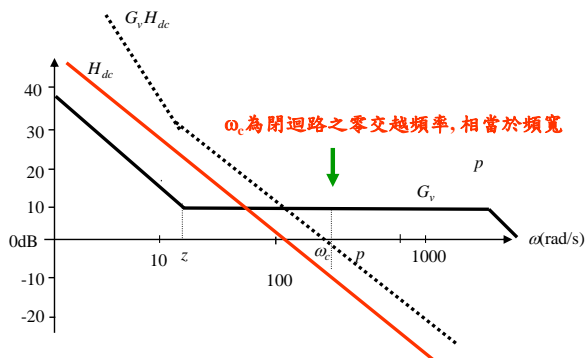
電壓控制器即可根據圖 3.4 之迴路增益來設計，由於三相整流器直流電壓無低頻漣波，無須 LPF(低通濾波器)用以衰減電壓 120Hz 或 360Hz 之低頻漣波成份以降低電流命令之失真度，因此控制器使用比例積分控制器(PI Controller)，其控制器轉移函式如下：

$$G_v = \frac{k(s+z)}{s} \quad (3.12)$$

(3.11)與(3.12)之頻率響應如圖 3.5 所示， $\omega_c$  為系統之零交越頻率頻寬， $G_v$  之零點選擇必須使得  $G_v H_{dc}$  在額定負載下零交越頻率  $\omega_c$  之斜率為 -20db/decade，依前述條件可設計零點  $z$  與比例增益常數  $k$ 。

圖 3.5

電壓迴路之頻率響應



### 3.4 鎖相迴路設計

所提逆變器鎖相迴路架構如圖 3.6 所示，其利用市電電壓( $V_{sa}$ ,  $V_{sb}$  及  $V_{sc}$ )經過  $abc-\alpha\beta$  軸轉換後得到二信號  $V_m \sin(\omega t)$  與  $-V_m \cos(\omega t)$ 。二信號再與其後產生之同步信號  $\cos(\omega_1 t)$  與  $\sin(\omega_1 t)$  分別相乘後相加得到：

$$e = V_m \{ \sin(\omega t) \cos(\omega_1 t) - \cos(\omega t) \sin(\omega_1 t) \} \quad (3.13)$$

(3.13)指出，若  $\omega = \omega_1$  則(3.13)等於零，因此可以利用此條件設計鎖相迴路控制器。信號  $e$  經過一比例積分器(PI)後得到一頻率修正信號  $\Delta\omega$ ，再與原設定頻率  $\omega_o (=377)$  相加後得到一頻率  $\omega_1$ ， $\omega_1$  再經過積分後得到一角度信號  $\theta$ ， $\theta$  再經過一  $0 \sim 2\pi$  之區間限制器後查閱 Sin() 表 (Sine table) 與 Cos() 表 (Cosine table) 得到  $\cos(\omega_1 t)$  與  $\sin(\omega_1 t)$  信號。藉由比例積分調整可以使誤差  $e$  為零，達到鎖相目地，亦即  $\omega = \omega_1$ 。

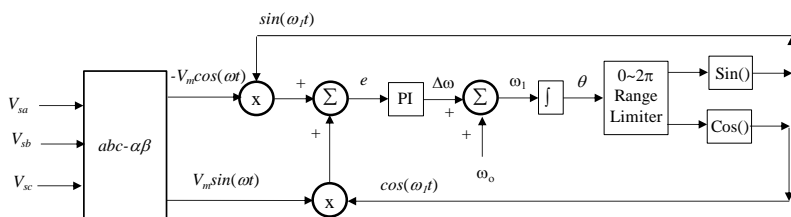


圖 3.6 鎖相迴路

### 3.5 系統之模擬驗證

本實驗以如下規格 250W 之逆變器來驗證上述各式控制方法：

DC Voltage $V_d = 100V$
AC Voltage $V_{LL} = 50V_{rms}$
$F_s = 18kHz$ , $V_{tri} = 10V_{pp}$ (PWM 三角波振幅)
$C_d = 330\mu F$ (直流鏈電容)
$L = 1mH$
$C = 10\mu F$
$K_s = 0.3$ (current sensing factor)
$K_v = 0.01$ (AC voltage sensing factor)
$K_v = 0.02$ (DC voltage sensing factor)

控制迴路設計之 Matlab 程式如下

```
% Three-phase Stand-alone Inverter
```

```
clear;
```

```
clc;
```

```
PI=3.1416;
```

```
Vd=100;
```

```
VLL=50;
```

```
Vs = 50/1.732;
```

```
Vsp = 1.5 * Vs * 1.414;
```

```
L=0.6e-3;
```

```
C=660e-6;
```

```
vtm=5;
```

```
kpwm=(Vd/2)/vtm
```

```
ks= 1/3.375
```

```
kv=1/100
```

```
kdc = Vsp/Vd;
```

```
fs=18e3;
```

```
% Voltage Loop Design
% Gv = k3(s+z)/s
% LPF = p/s+p
uv = 2 * PI * 20
z = 30
p = 7.23e3 * 2 * PI
tuv = 1/z
numHdc = kv*kdc/(ks*C);
denHdc=[1 0];
Hdc=tf(numHdc,denHdc);
Hdcr = freqresp(Hdc, uv);
Gc = 1/abs(Hdcr);
numGv1= [1 z];
denGv= [1 p 0];
Gv1 = tf(numGv1, denGv);
Gv1r = freqresp(Gv1, uv);
K3r = 1 / (abs(Hdcr) * abs(Gv1r));
K3 = K3r/p
numGv = K3r * numGv1;
Gv = tf(numGv, denGv);
GvHdc = series(Gv, Hdc);
bode(Hdc,Gv,GvHdc);
grid;
```

計算結果如下=>

```
ks = 0.2963
kv = 0.0100
uv = 125.6640
z = 30
p = 4.5428e+004
```



$tuv = 0.0333$

$K3 = 3.9038$

電壓迴路波德圖如圖 3.7 所示。

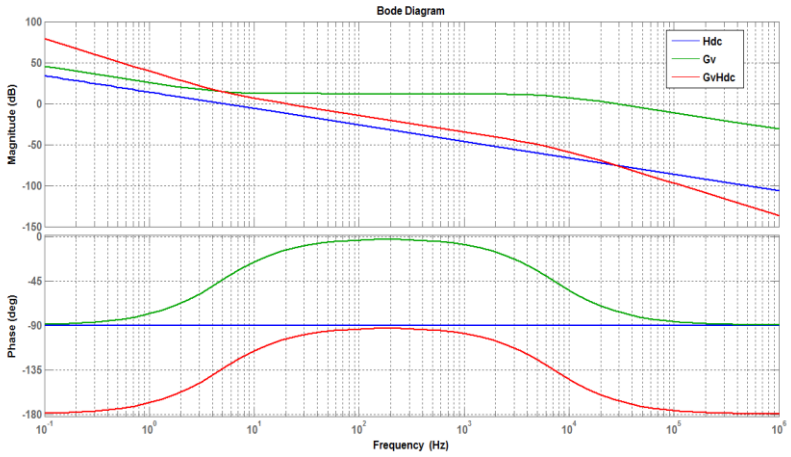


圖 3.7 電壓迴路波德圖

## 電路模擬

---

### 逆變器規格

- DC Voltage  $V_d = 100V$
  - AC Voltage  $V_{LL} = 50V_{rms}$ 、頻率 60Hz
  - $F_s = 18kHz$ ， $V_{tri} = 10V_{pp}$  (PWM)， $C_d = 330\mu F$ ， $L = 1mH$ ， $C = 10\mu F$
  - $K_s = 0.3$  (current sensing factor) ，
  - $K_v = 0.01$  (AC voltage sensing factor)
  - $K_v = 0.02$  (DC voltage sensing factor)
-

PSIM 模擬

根據上述參數所建制之模擬電路如圖 3.8 所示，模擬結果如圖 3.9 所示。

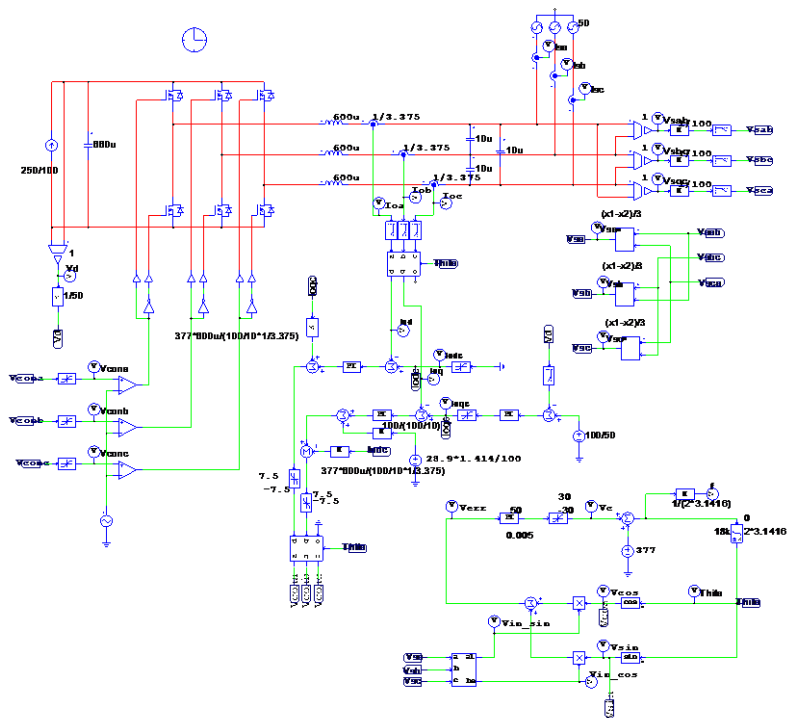


圖 3.8 三相 Grid-connected 模擬電路

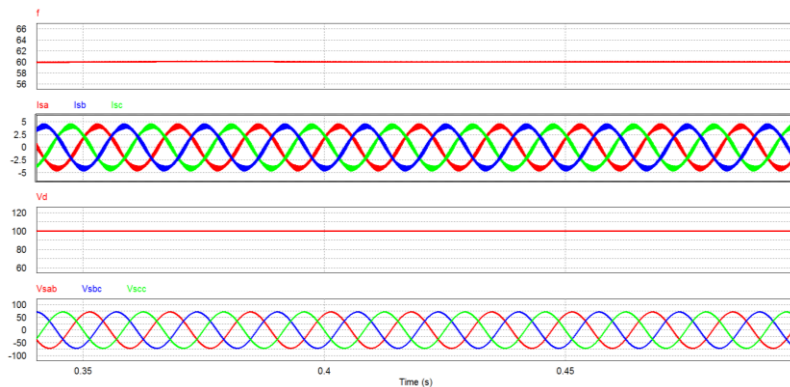


圖 3.9 三相 Grid-connected 模擬結果

## SimCoder 程式規劃及電路模擬

以 SimCoder 建立之三相 Grid-connected 逆變器模擬電路如圖 3.10 所示，模擬結果如圖 3.11 所示。

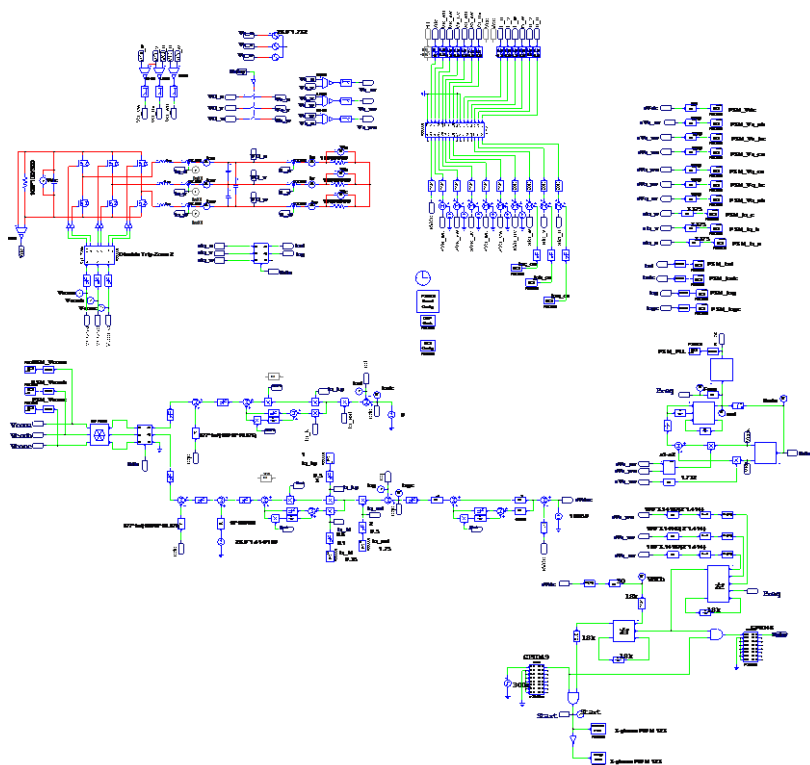


圖 3.10 以 SimCoder 建立之三相 Grid-connected 逆變器模擬電路

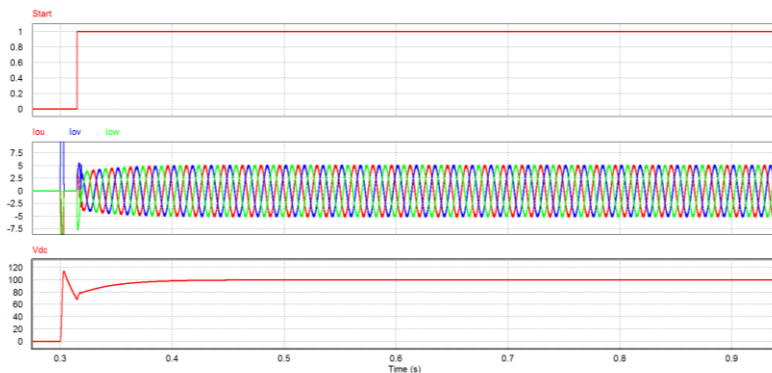


圖 3.11 以 SimCoder 建立之三相 Grid-connected 逆變器模擬結果

## 實驗設備

本實驗所需設備如下：

PEK-130 一台

PEK-005A 一台

PEK-006 一台

PTS-3000 一台(其中使用 GDS-2204E, PSW160-7.2, APS-300, GPL-300A)

PC 一台

## 實驗步驟

實驗接線圖如圖 3.12，請依此圖完成接線。



圖 3.12 實驗三接線圖

接線完畢後，先確認 PEK-130 開關為 OFF，之後開啟 PEK-005A 的開關，開啟後 DSP 的紅色顯示燈亮起，如圖 3.13，此時表示 DSP 電源正常。



圖 3.13 DSP 正常工作畫面

將“PEK-130\_Lab3\_V11.0.3”程式燒入 DSP 中，請依照附錄 B(燒錄流程)進行燒錄，再請依照附錄 C(RS232 連線)進行連線。

將示波器探棒分別接至 Vo-AB，Vo-BC，Vo-CA 上，如圖 3.14



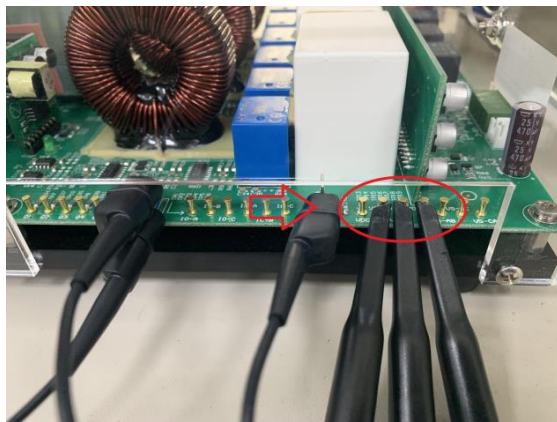


圖 3.14 示波器探棒接線圖

PSW160-7.2 設定為電壓 110V、電流 1A，GPL-300A 電源開啟後，Three Phase Load 設定為 Resistance Load，1TS,2TS 設定為 OFF，3TS 設定為 ON，此時為空載，如圖 3.15。

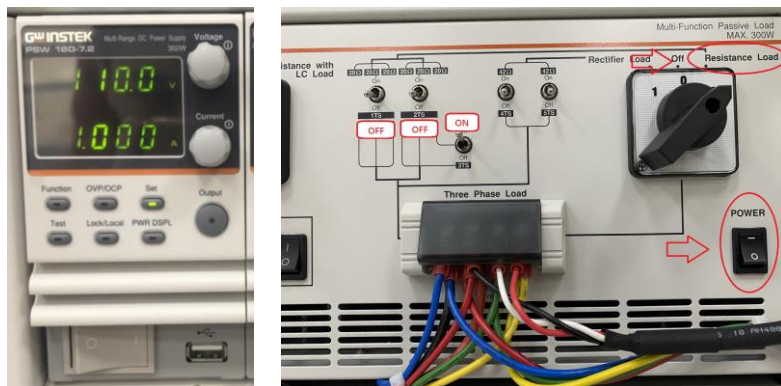


圖 3.15 PSW 160-7.2 與 GPL-300A 設定圖

APS-300 電源開啟後，設定頻率為 60Hz，模式為 3P4W，輸出電壓為 28.86V，如圖 3.16 所示



**圖 3.16 APS-300 設定圖**

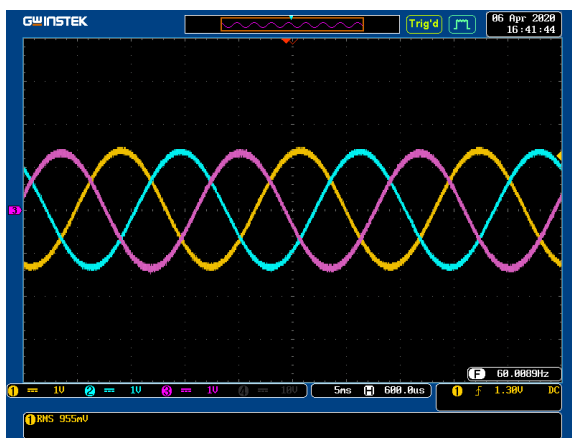
設定完畢後，PSW 與 APS-300 電源輸出後，再將 PEK-130 開關開啟。

## 實驗結果

### (1) 空載

三相電壓輸出  $V_o$ -AB、 $V_o$ -BC、 $V_o$ -CA 的量測波形如圖 3.17，在空載條件下，PSW 輸出功率為 100W，此時因沒有負載，故所有能量須由 APS-300 吸收，可以看到 APS 功率為單相-30.5W(負號表吸收能量)三相總功率為  $-30.5W \times 3 = -91.5W$ ，與 PSW 輸出功率相符(考量元件損耗)，如圖 3.18

圖 3.17  
 $V_o$ -AB、 $V_o$ -BC、 $V_o$ -CA 的量測波形



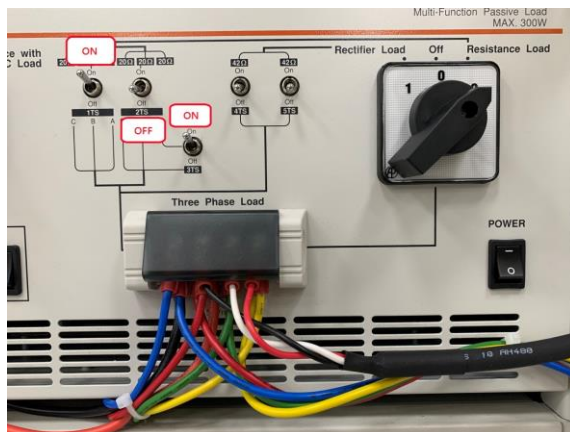
3.18 空載下 PSW 與 APS-300 的功率狀態

(2) 半載(20 Ohm)

1TS,3TS 設定為 ON，2TS 設定為 OFF，如圖 3.19，此時負載為半載

圖 3.19

GPL-300A 半載設定



在半載條件下，PSW 輸出功率為 100W，此時負載為半載(125W)，因 PSW 輸出功率不能滿足負載的需求，故 APS-300 須提供 25W 以維持系統的功率平衡，可以看到 APS 功率為單相 11.2W，三相總功率為  $11.2W * 3 = 33.6W$  (考量元件損耗)，如圖 3.20

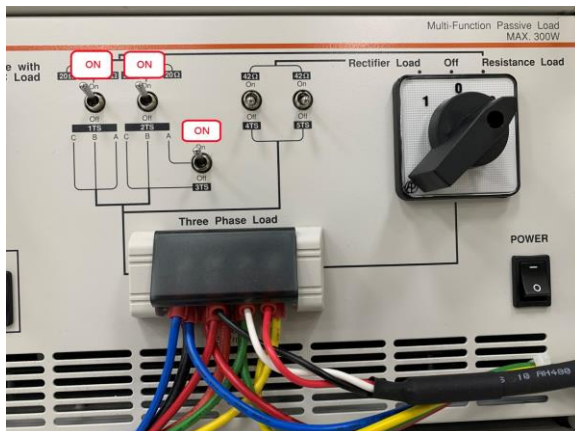


3.20 半載下 PSW 與 APS-300 的功率狀態

## (3) 滿載(10 Ohm)

1TS,2TS,3TS 設定為 ON，如圖 3.21，此時負載為滿載

圖 3.21  
GPL-300A 滿載設定



在滿載條件下，PSW 輸出功率為 100W，此時負載為滿載(250W)，因負載需求更大的功率，故 APS-300 須提供 150W 以維持系統的功率平衡，可以看到 APS 功率為單相 51.6W，三相總功率為  $51.6W \times 3 = 154.8W$  (考量元件損耗)，如圖 3.22



圖 3.22 滿載下 PSW 與 APS-300 的功率狀態

實驗完畢後，請先關閉 PEK-130，隨後再將 PSW 與 APS-300 及 GPL-300A 關閉。

# 實驗 4 單相三臂式整流逆變器

## 變器

### 實驗目的

電路由於有三臂，因此也可用於單相 on-line UPS，本實驗將學習 UPS 之工作模式、Rectifier 及 Inveter 之電流迴路及電壓迴路控制器設計、硬體規劃及 SimCoder 程式撰寫等。

### 實驗原理

#### 4.1 電路架構

圖 4.1 所示之三臂式整流-逆變器電路可節省直流電容可以降低成本外，其中間臂(COM-arm)電流為輸入電流與負載電流之差值，在 PFC 條件下僅需流通負載之虛功、諧波電流及補償轉換器本身損失之小量實功成分，導通損亦較傳統為低。

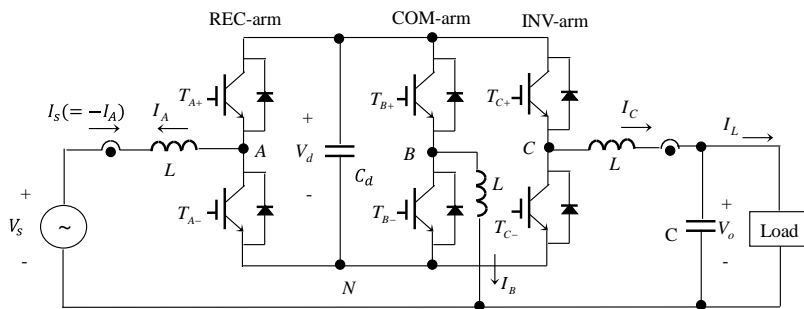


圖 4.1 單相三臂式整流-逆變器電路架構

## 4.2 電路模型

由圖 4.1 之三臂式整流-逆變器電路可以推得：

$$L \frac{dI_A}{dt} = V_{AN} - V_{BN} - V_S \quad (4.1)$$

$$L \frac{dI_C}{dt} = V_{CN} - V_{BN} - V_O \quad (4.2)$$

$$C \frac{dV_O}{dt} = I_C - I_L \quad (4.3)$$

各臂均採用 PWM 切換，控制電壓( $v_{conA}$ 、 $v_{conB}$ 、 $v_{conC}$ )分別與三角波( $v_{tri}$ )比較以觸發三臂之開關，則(4.1)及(4.2)中各臂之輸出電壓可寫為：

$$V_{iN} = \left( \frac{1}{2} + \frac{v_{coni}}{2v_{tm}} \right) V_d \quad (i=A, B, C) \quad (4.4)$$

其中  $v_{tm}$  為 PWM 三角波之振幅重新將(4.4)代入(4.1)、(4.2)可得：

$$L \frac{dI_A}{dt} = \frac{V_d}{2v_{tm}} v_{conA} - \frac{V_d}{2v_{tm}} v_{conB} - V_S \quad (4.5)$$

$$L \frac{dI_C}{dt} = \frac{V_d}{2v_{tm}} v_{conC} - \frac{V_d}{2v_{tm}} v_{conB} - V_O \quad (4.6)$$

令

$$k_{pwm} = \frac{V_d}{2v_{tm}} \quad (4.7)$$

(4.5)、(4.6)可重新表示為：

$$L \frac{dI_A}{dt} = k_{pwm} v_{conA} - k_{pwm} v_{conB} - V_S \quad (4.8)$$

$$L \frac{dI_C}{dt} = k_{pwm} v_{conC} - k_{pwm} v_{conB} - V_O \quad (4.9)$$

(4.8)、(4.9)顯示整流臂與逆變臂之輸出均受共同臂影響，若欲使二者之切換不會產生交互作用，(4.8)及(4.9)必須解耦。一最簡單之解耦方法為中間臂控制電壓之設定可為：

$$v_{conB} = -\frac{v_o}{2k_{pwm}} \quad (4.10)$$

如此(4.8)及(4.9)可以再表示為：

$$L \frac{dI_A}{dt} = k_{pwm} v_{conA} + \frac{V_o}{2} - V_s \tag{4.11}$$

$$L \frac{dI_C}{dt} = k_{pwm} v_{conC} - \frac{V_o}{2} \tag{4.12}$$

### 4.3 整流器控制器設計

電流迴路控制器之設計可根據上述所推導之電路模型(4.11)進行，實際中間臂之 PWM 控制電壓乃依據(4.10)並利用負載電壓命令( $v_{oc}$ )產生：

$$v_{conB} = -\frac{v_{oc}}{2k_v k_{pwm}} \tag{4.13}$$

其中  $k_v$  及  $k_s$  分別為電壓及電流之感測比例。圖 4.2 所示為整流器之電流迴路之控制方塊圖，其中電力電路部分乃根據(4.11)所繪， $k_s$  為電流之感測比例。電流控制迴路採用前向(feedforward)與迴授控制並用，前向控制信號  $v_{fFR}$  利用輸入電壓之正常值( $v_{sc}$ )以及負載電壓之命令( $v_{oc}$ ) (經由  $v_{conB}$  之設定)直接消除  $V_s$  及  $V_o/2$  之擾動，如此電流迴授控制器  $k_1$  僅使用一比例(P)控制即可。輸入電流追蹤其命令之響應由圖 4.2 可推知為：

$$\frac{i_A}{i_A^*} = \frac{\frac{k_{pwm} k_s k_1}{L}}{s + \frac{k_{pwm} k_s k_1}{L}} = \frac{u_{RI}}{s + u_{RI}}, \quad u_{RI} = \frac{k_{pwm} k_s k_1}{L} \tag{4.14}$$

其中  $u_{RI}$  相當於電流迴路之頻寬，此處乃設計於切換頻率之 1/10。輸入電流命令  $i_A^*$  乃由直流電壓迴路所產生，回授直流電壓( $v_d$ )與直流電壓命令( $v_{dc}$ )之誤差經由電壓控制器  $G_v$  調整後得到一振幅信號  $im$ ，其乘上一單位正弦波  $\sin\omega t$  後經反向得到 A 臂之電流命令( $i_{Ac}$ )。

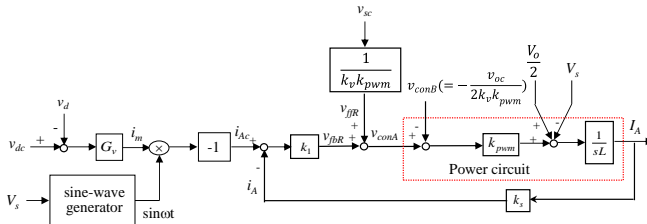


圖 4.2 整流器電流迴路控制方塊圖



$G_v$  之設計必須推導直流電壓迴路之模型，可視整流器操作在單位功因來推導，由於整流器之直流鏈提供 (或承接) 逆變器負載功率，並由市電提供 (或吸收) 之電力，對於整流器及逆變器整合之兩級式電路，直流側之小信號模型可視為一直流小信號電流 ( $I_d$ ) 對直流電容充電即可，如圖 4.3(a) 所示。交流側之輸入功率為：

$$\begin{aligned} P_{ac} &= V_{s(p)} \sin \omega t \cdot I_m \sin \omega t = \frac{V_{s(p)} I_m}{2} - \frac{V_{s(p)} I_m}{2} \cos 2\omega t \\ &= \bar{P}_{ac} + \tilde{P}_{ac2} \end{aligned} \quad (4.15)$$

其中  $V_{s(p)}$  及  $I_m$  分別為輸入電壓及電流之峰值，(4.15) 除了一直流項之外亦包含一二次之諧波項，此二次諧波項將造成直流電壓二次之漣波成份。直流側之平均功率等於交流側功率之直流項：

$$\bar{P}_{ac} = P_{dc} \quad (4.16)$$

將交流電流源反應至直流側可得圖 4.3(b) 之等效電路，根據 (4.16) 可得：

$$\frac{V_{s(p)} I_m}{2} = V_d I_d \quad (4.17)$$

$$I_d = \frac{V_{s(p)} I_m}{2V_d} = k_{dc} I_m \quad (4.18)$$

由直流電流源  $I_d$  對  $C_d$  電容充電可得電壓迴路之模型為：

$$\frac{V_d}{I_m} = \frac{k_{dc}}{sC_d}, \quad k_{dc} = \frac{V_{s(p)}}{2V_d} \quad (4.19)$$

根據 (4.19) 可得整流器直流電壓控制迴路方塊圖如圖 4.4(a) 所示，電壓控制器  $G_v$  可根據圖 4.4(a) 來設計，其中由於電流迴路頻寬較電壓迴路頻寬要寬出非常多，因此可以將 (4.14) 之電流迴路響應簡化為等於 1，因此  $i_m$  至實際  $I_A$  之電流振幅  $I_m$  之增益即為電流感測比例  $k_s$  之倒數，電壓迴路  $H_{dc}$  之波德圖可繪出如圖 4.4(b) 所示。考慮直流電壓具有二次漣波，為使市電電流命令為低失真，電壓迴路之頻寬必須遠低於 120Hz 以衰減電壓之二次漣波，因此  $G_v$  採用 type II 補償器 (即 PI + Low-Pass) 之設計方式，其波德圖如圖 4.4(b) 所示，迴路之增益 (loop response)  $G_v H_{dc}$  之零交越頻率一般置於 20Hz (125.6rad/s)。

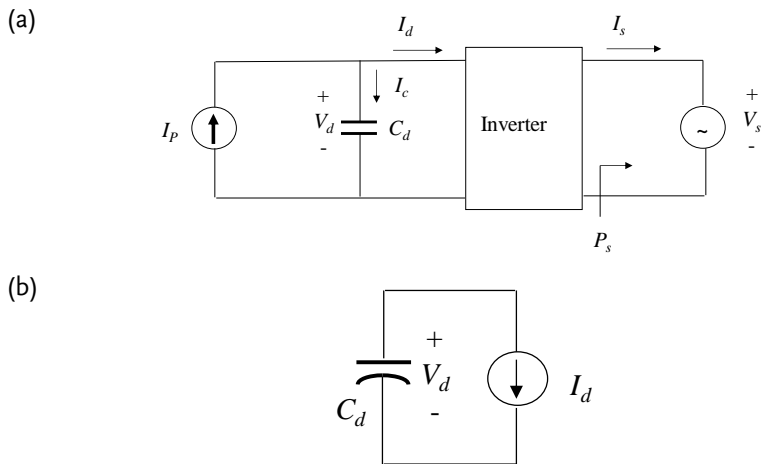


圖 4.3 整流器在單位功因下之 (a) 等效電路 (b) 直流側小信號等效電路

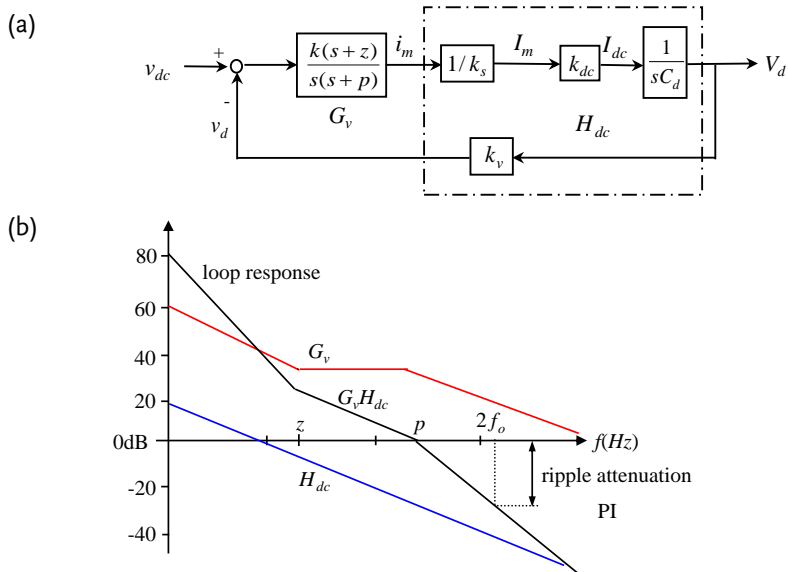


圖 4.4 整流器直流電壓控制迴路：(a) 方塊圖，(b) 波德圖

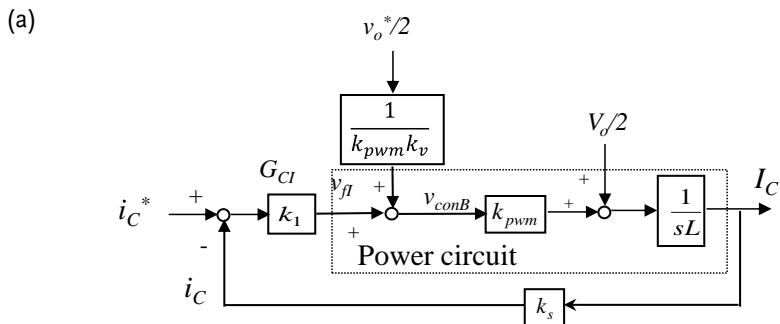
### 4.4 逆變器控制器設計

圖 4.5(a)所示為逆變器之電流迴路之控制方塊圖，其中電力電路部分乃根據(4.12)所繪。電流控制迴路同樣的亦採用前向(feedforward)與迴授控制並用，前向控制利用輸出電壓之命令( $v_o^*/2$ )直接消除  $V_o/2$  之擾動，如此電流迴授控制器  $k_1$  僅使用一比例(P)控制即可。輸入電流追蹤其命令之響應由圖 4.5(a)可推知為：

$$\frac{i_c}{i_c^*} = \frac{\frac{k_{pwm}k_s k_1}{L}}{s + \frac{k_{pwm}k_s k_1}{L}} = \frac{u_{II}}{s + u_{II}}, u_{II} = \frac{k_{pwm}k_s k_1}{L} \quad (4.20)$$

其中  $u_{II}$  相當於電流迴路之頻寬，此處乃設計於切換頻率之 1/10。

逆變器電流命令  $i_c^*$  乃由電壓控制迴路所產生，電壓迴路之控制方塊圖如圖 4.5(b)所示，其中電力電路部分乃根據(4.12)所繪。回授輸出電壓( $v_o$ )與電壓命令( $v_o^*$ )之誤差經由電壓控制器  $G_{ol}$  調整後得到一信號  $v_{fi}$ ， $v_{fi}$  再加上一前向控制信號  $i_L$  後得到最終之電流命令( $i_c^*$ )。前向控制信號  $i_L$  乃用以得抵消負載電流( $I_L$ )對於電壓追蹤響應之擾動。電壓命令( $v_o^*$ )乃由一振幅信號( $v_m$ )乘上單位正弦波  $\sin\omega t$  所產生，為了使輸出電壓具備良好之均方根值電壓調整率，振幅信號( $v_m$ )乃由電壓均方根值的迴授信號( $v_{rms}$ )與均方根值命令( $v_{rmsc}$ )之誤差經由一 PI 形式之誤差放大器( $G_M$ )所產生之誤差調整信號，加上原均方根值命令所產生之振幅信號( $\sqrt{2}v_{rmsc}$ )而得。如此之電壓控制迴路具備瞬時電壓控制與均方根值電壓調整，確保輸出電壓為低失真且具良好之電壓調整率。



(b)

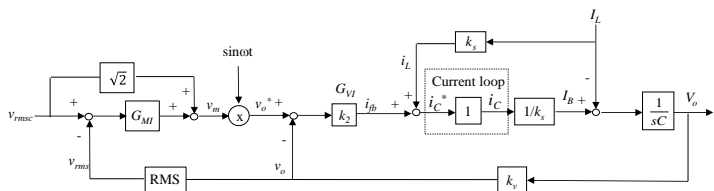


圖 4.5 逆變器控制迴路方塊圖：(a) 電流迴路，(b) 電壓迴路

## 電路模擬

逆變器規格

- 負載(3 段可切換) = 42 / 21 / 14 ohm
- AC Voltage = 40Vrms , 60Hz
- $F_s = 18\text{kHz}$  ,  $V_{tri} = 10V_{pp}$  (PWM) ,  $C_d = 330\mu\text{F}$  ,  $L = 1\text{mH}$  ,  $C = 10\mu\text{F}$
- $K_s = 0.3$  (current sensing factor) ,
- $K_v = 0.01$  (AC voltage sensing factor)
- $K_v = 0.02$  (DC voltage sensing factor)

## PSIM 模擬

根據上述參數所建置之模擬電路如圖 4.6 所示，在線性負載下之模擬結果如圖 4.7 所示。

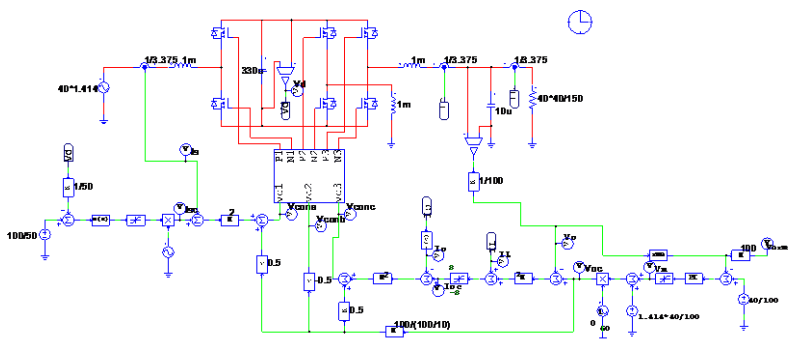


圖 4.6 三臂式單相整流器-逆變器模擬電路

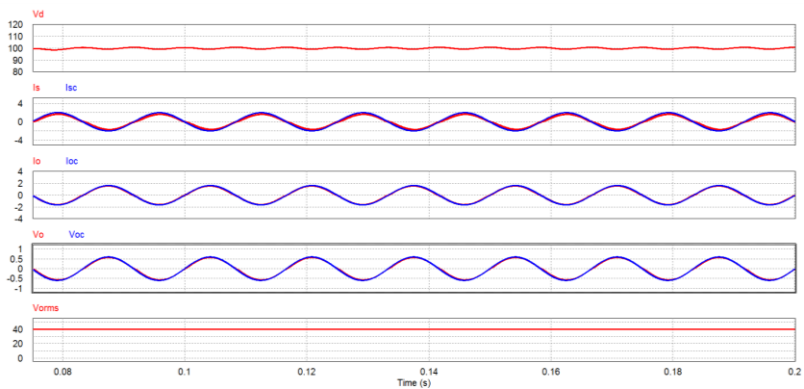


圖 4.7 三臂式單相整流器-逆變器模擬結果

## SimCoder 程式規劃及電路模擬

以 SimCoder 建立之三臂式單相整流器-逆變器模擬電路如圖 4.8 所示，在線性負載模擬結果如圖 4.9 所示。

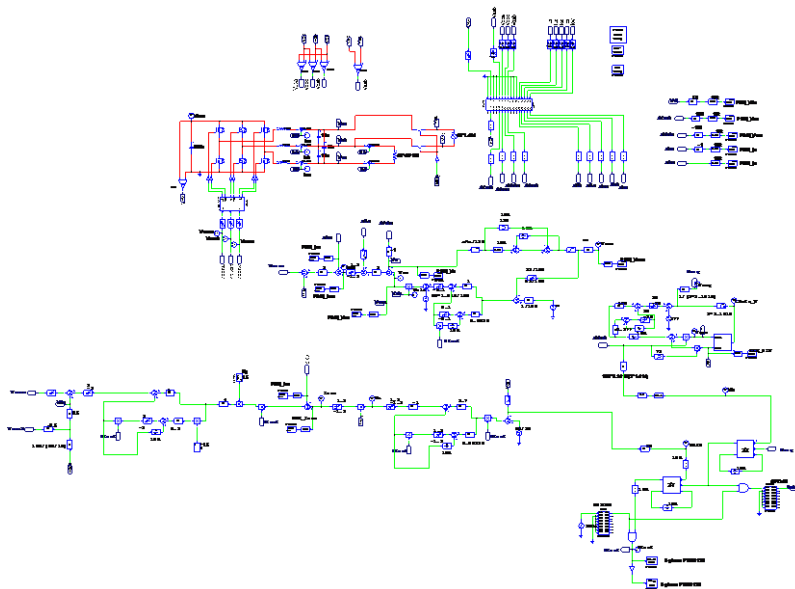


圖 4.8 以 SimCoder 建立之三臂式單相整流器-逆變器模擬電路

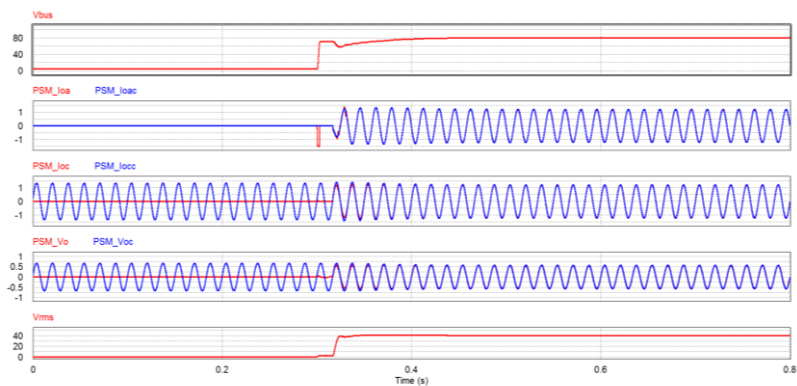


圖 4.9 以 SimCoder 建立之三臂式單相整流器-逆變器模擬結果

## 實驗設備

本實驗所需設備如下:

PEK-130 一台

PEK-005A 一台

PEK-006 一台

PTS-3000 一台(其中使用 GDS-2204E, APS-300, GPL-300A)

PC 一台



## 實驗步驟

因為本實驗是在三相逆變器中使用單相輸入，所以 APS-300 與 GPL-300A 的單相端子須作如圖 4.10 的調整，修改後再依圖 4.11，完成此實驗的接線。

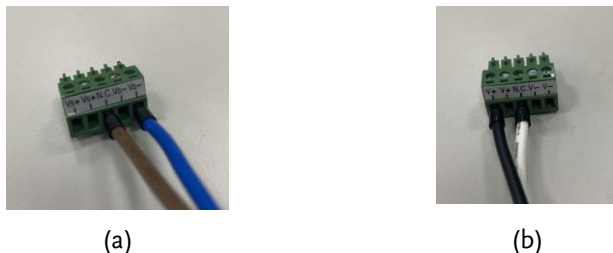


圖 4.10(a) APS-300 端子調整 (b) GPL-300A 端子調整



圖 4.11 實驗四接線圖

接線完畢後，先確認 PEK-130 開關為 OFF，之後開啟 PEK-005A 的開關，開啟後 DSP 的紅色顯示燈亮起，如圖 4.12，此時表示 DSP 電源正常。



圖 4.12 DSP 正常工作畫面

將“PEK-130\_Lab5\_V11.0.3”程式燒入 DSP 中，請依照附錄 B(燒錄流程)進行燒錄，再請依照附錄 C(RS232 連線)進行連線。

將示波器探棒分別接至 Vs-AB, Vo-BC, Io-A 與 Io-C 上，如圖 4.13

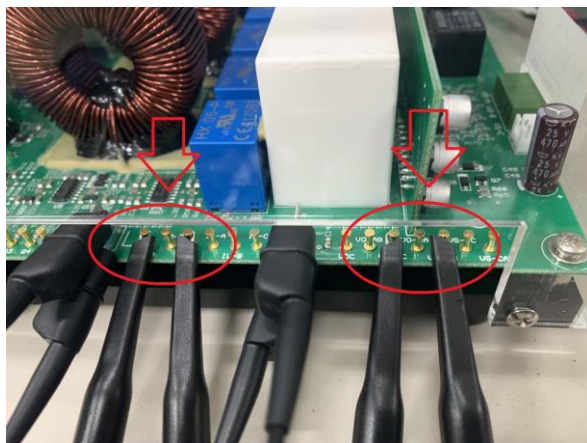


圖 4.13 示波器探棒接線圖

GPL-300A 電源開啟後，Single Phase Load 設定為 Resistance Load，1SS 設定為 ON，2SS 與 3SS 設定為 OFF，此時負載為 42ohm，如圖 4.14。

圖 4.14  
GPL-300A 設定圖  
(42ohm)



APS-300 電源開啟後，設定頻率為 60Hz，模式為 1P2W，輸出電壓為 40V，如圖 4.15 所示

圖 4.15  
APS-300 設定圖



設定完畢後，APS-300 電源輸出後，再將 PEK-130 開關開啟。

## 實驗結果

### (1) 三臂式單相整流器-逆變器 線性負載

圖 4.16 為輸出電壓電流、輸入電壓電流的波形；因為電流的方向與電流感測相反，所以我們需要將電流量測探棒反轉，如圖 4.17 所示，黃色波形量測是輸入電壓  $V_s$ -AB，綠色是輸入電流  $I_o$ -A(反轉)，粉紅色是輸出電流  $I_o$ -C(反轉)，藍色是輸出電壓  $V_o$ -BC。

圖 4.16

輸出電壓電流、輸入電壓電流波形  
(負載 42ohm)

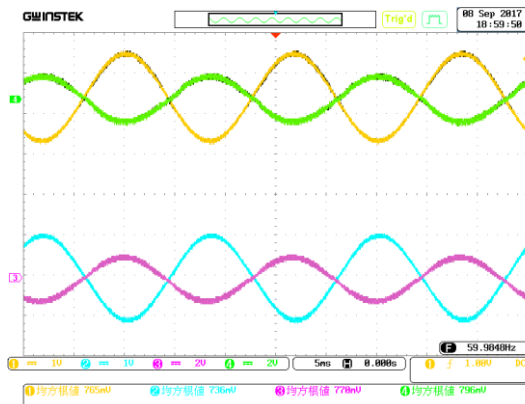
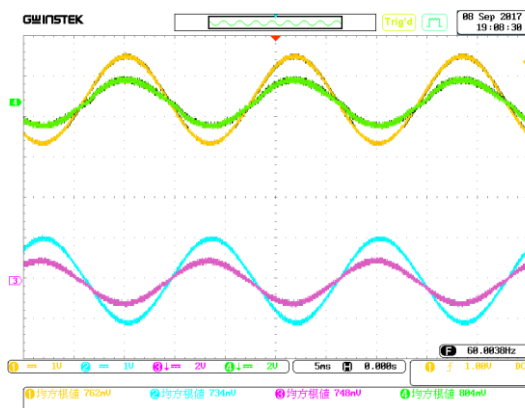


圖 4.17

反轉後輸出電壓電流、輸入電壓電流  
波形



以上測試負載為 42ohm，也可切換成 21ohm，如圖 4.18 所示，將 1SS 與 2SS 設定為 ON，3SS 設定為 OFF；圖 4.19 為輸出電壓電流、輸入電壓電流波形(負載 21ohm)。

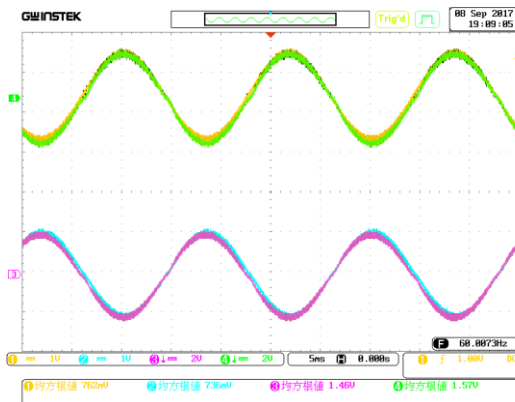
圖 4.18

GPL-300A 設定圖  
(21ohm)



圖 4.19

輸出電壓電流、輸入  
電壓電流波形  
(負載 21ohm)。



也可切換成 14ohm，如圖 4.20 所示，將 1SS、2SS 與 3SS 設定為 ON；圖 4.21 為輸出電壓電流、輸入的電壓電流波形(負載 14ohm)。

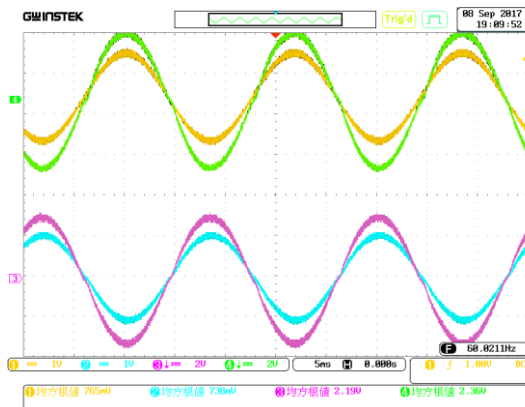
圖 4.20

GPL-300A 設定圖  
(14ohm)



圖 4.21

輸出電壓電流、輸入電壓電流波形 (負載 14ohm)



將波形透過 RS232 回傳到電腦端，為了節省篇幅，以下將在電腦端觀測到的波形只顯示負載為 14ohm 之數據，如圖 4.22 所示為輸入電壓  $V_{ac}$ 、輸入電流  $I_s$  及直流電壓  $V_{dc}$ ，圖 4.23 所示為輸出電壓  $V_{out}$ 、輸出電流  $I_o$  及直流電壓  $V_{dc}$ ，圖 4.24 為  $I_{oc}$  與  $I_{occ}$  輸出電流命令追蹤，圖 4.25 為  $I_{oa}$  與  $I_{oac}$  輸入電流命令追蹤，圖 4.26 為  $V_o$  與  $V_{oc}$  輸出電壓命令追蹤。

圖 4.22

從 RS232 回傳輸入電壓、輸入電流及直流電壓圖

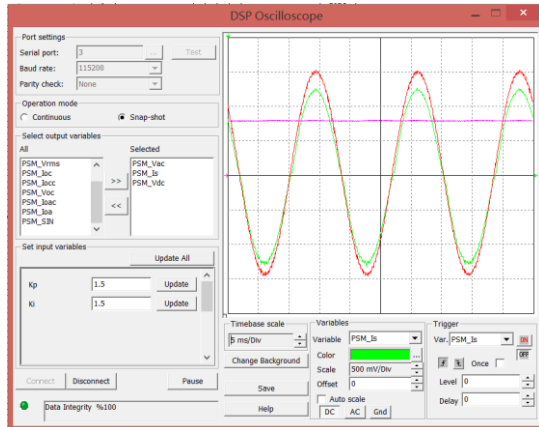


圖 4.23

從 RS232 回傳輸出  
電壓、輸出電流及  
直流電壓

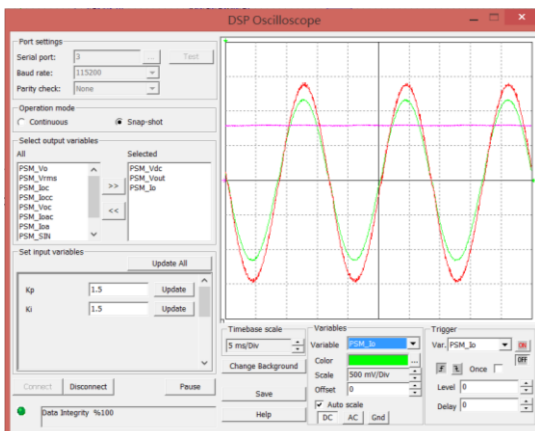


圖 4.24

從 RS232 回傳控制  
迴路之  $i_{oc}$  與  $i_{occ}$   
輸出電流命令追蹤

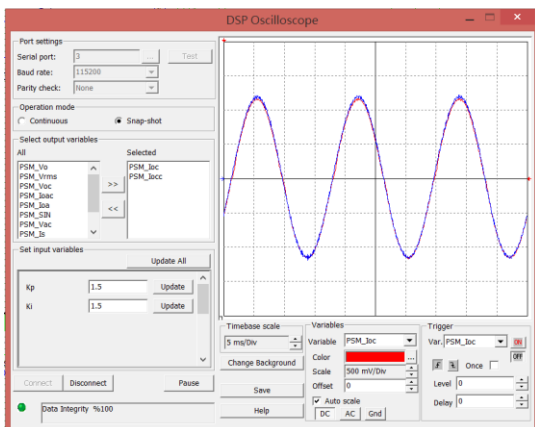


圖 4.25

從 RS232 回傳控制  
迴路之  $i_{oa}$  與  $i_{oac}$   
輸入電流命令追蹤

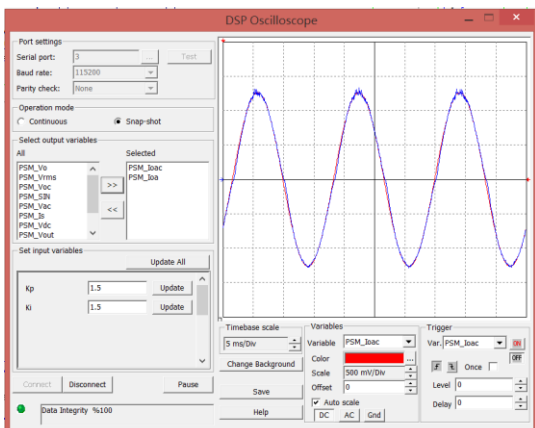
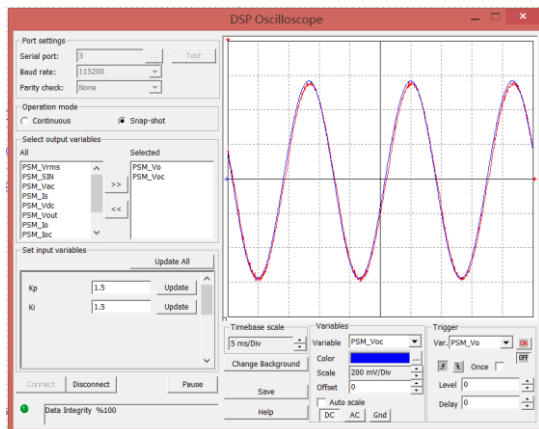


圖 4.26

從 RS232 回傳控制迴路之  $V_o$  與  $V_{oc}$  輸出電壓命令追蹤



實驗結束後，關閉 PEK-130 啟動鈕，再將 GPL-300A 轉至 OFF 檔，而後關閉 APS-300。

## (2) 三臂式單相整流器-逆變器 整流性負載

重複實驗步驟，其中調整 GPL-300A 的設定，將其轉至 Rectifier Load, 1SS 設定為 ON, 2SS 與 3SS 設定為 OFF, 此時為 42ohm 的整流性負載，如圖 4.27 所示。

圖 4.27

GPL-300A 整流性負載 42ohm 設定圖

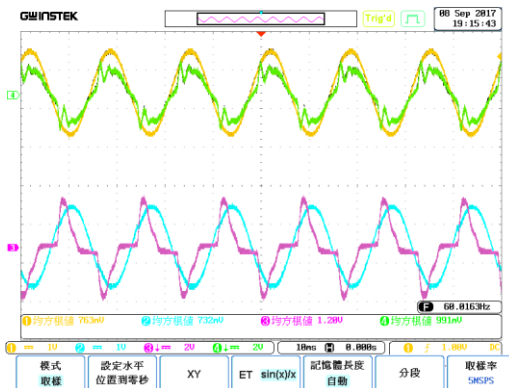


圖 4.28 為輸出電壓電流、輸入電壓電流波形，測試負載為 42ohm。



圖 4.28

整流性負載之輸出電壓電流、輸入電壓電流波形



也可切換成 21ohm，如圖 4.29 所示，將 1SS 與 2SS 設定為 ON，3SS 設定為 OFF，此時負載為 21ohm；圖 4.30 為輸出電壓電流、輸入電壓電流波形(負載 21ohm)。

圖 4.29

GPL-300A 整流性負載 21ohm 設定圖

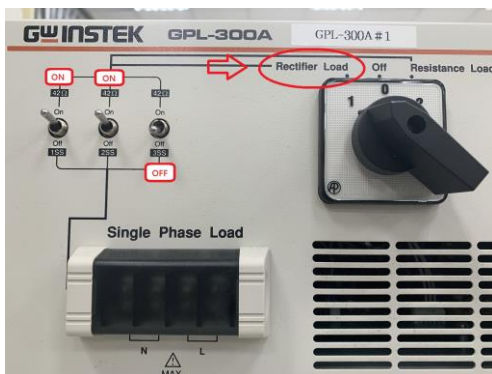
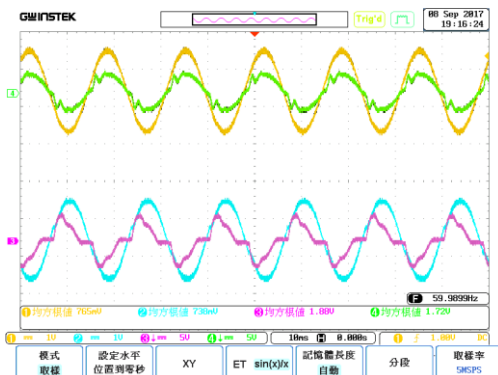


圖 4.30

輸出電壓電流、輸入電壓電流波形(負載 21ohm)。



也可切換成 14ohm，如圖 4.31 所示，將 1SS、2SS 與 3SS 設定為 ON，此時負載為 14ohm；圖 4.32 為輸出電壓電流、輸入電壓電流波形(負載 14ohm)。

圖 4.31

GPL-300A 整流性負載 14ohm 設定圖

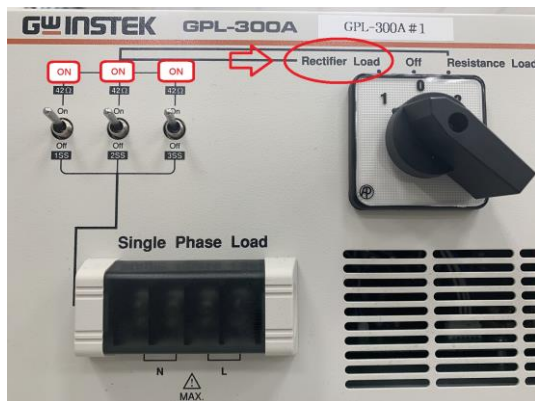
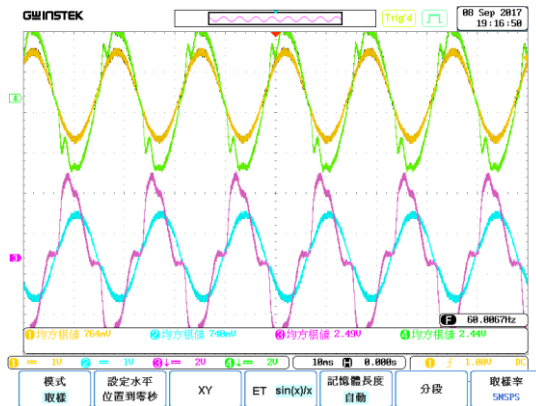


圖 4.32

輸出電壓電流、輸入電壓電流波形 (負載 14ohm)



將波形透過 RS232 回傳到電腦端看到的結果，如圖 4.33 所示為輸入電壓  $V_{ac}$ 、輸入電流  $I_s$  及直流電壓  $V_{dc}$ ，圖 4.34 所示為輸出電壓  $V_{out}$ 、輸出電流  $I_o$  及直流電壓  $V_{dc}$ ，圖 4.35 為  $I_{oc}$  與  $I_{occ}$  輸出電流命令追蹤，圖 4.36 為  $I_{oa}$  與  $I_{oac}$  輸入電流命令追蹤，圖 4.37 為  $V_o$  與  $V_{oc}$  輸出電壓命令追蹤。



圖 4.36

從 RS232 回傳控制迴路之  $I_{oa}$  與  $I_{oc}$  輸入電流命令追蹤

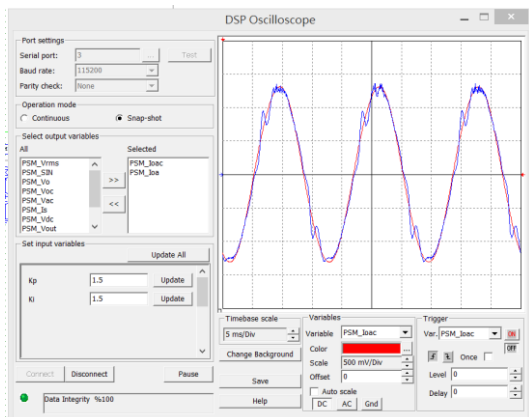
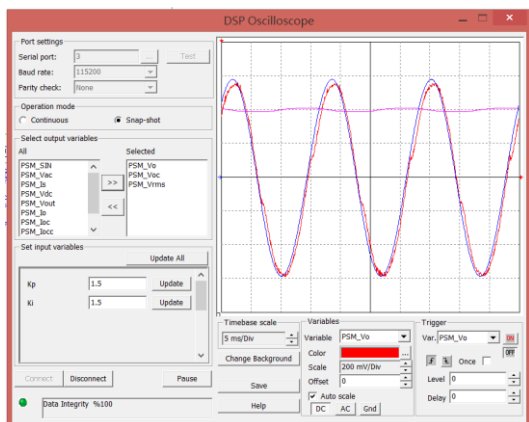


圖 4.37

從 RS232 回傳控制迴路之  $V_o$  與  $V_{oc}$  輸出 2 電壓命令追蹤



實驗結束後，關閉 PEK-130 啟動鈕，再將 GPL-300A 轉至 OFF 檔，而後關閉 APS-300。最後，請將 APS-300 與 GPL-300A 的輸出端子修改回初始設定，如圖 4.38。



(a)



(b)

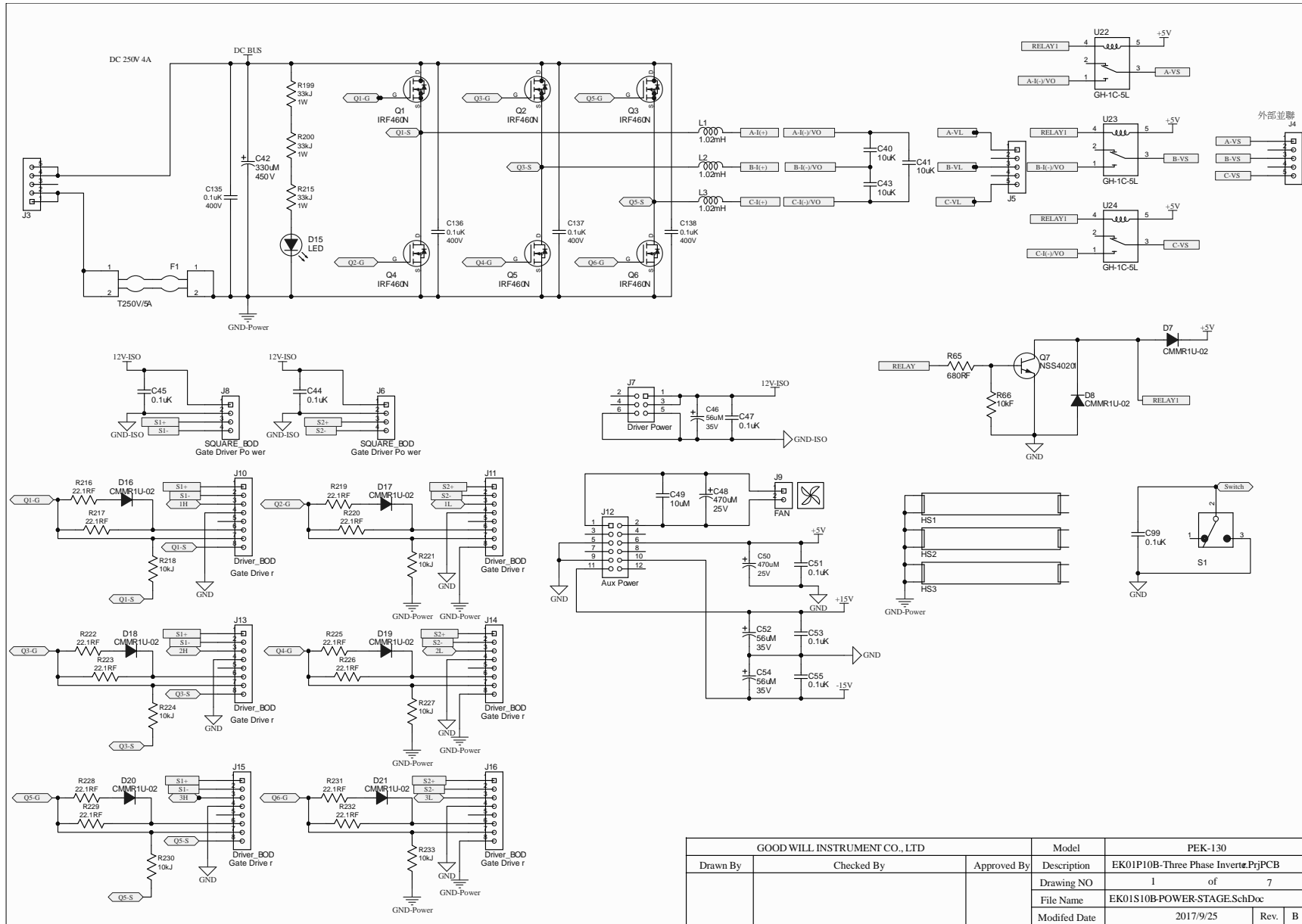
圖 4.37(a) APS-300 端子復原 (b) GPL-300A 端子復原

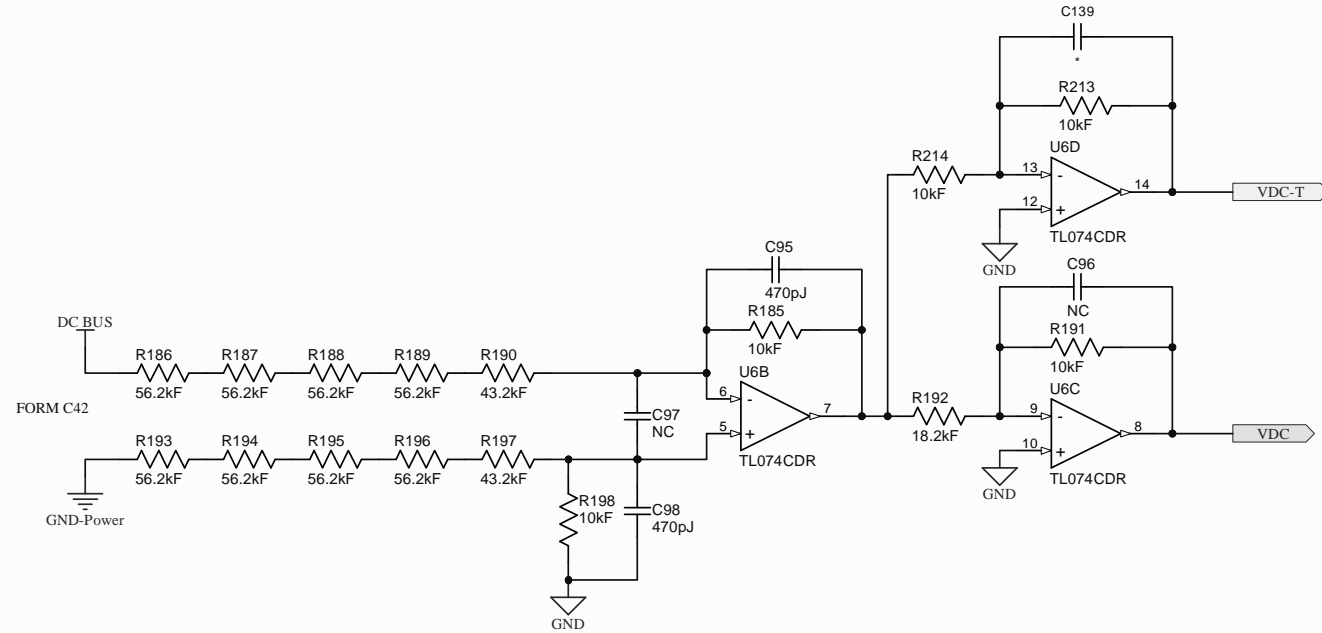
# 附錄 A PEK-130 電路圖

---

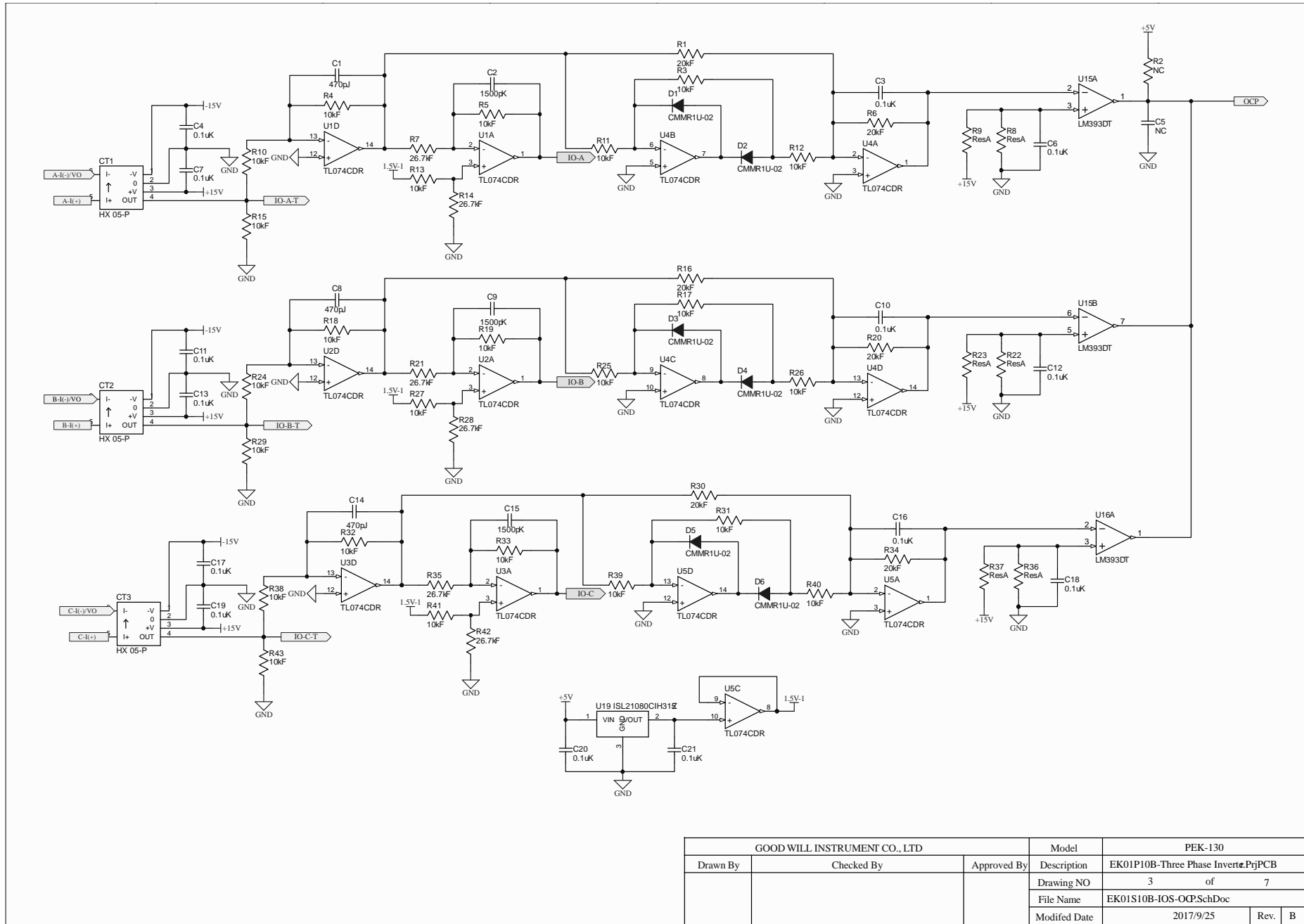
Three Phase Inverter.....	108
F28335 Delfino control CARD.....	115
Gate Driver Power .....	116
Gate Driver .....	117

Three Phase Inverter



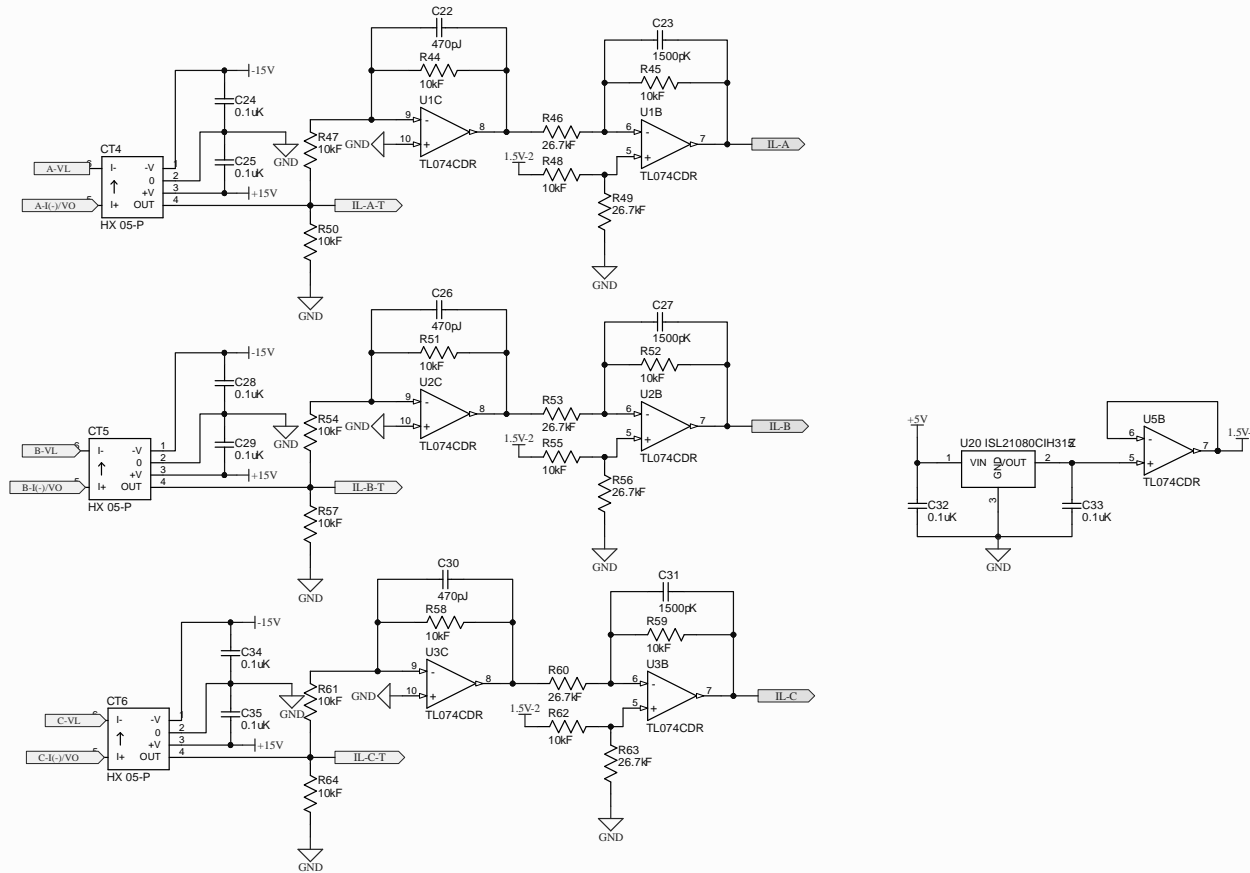


GOOD WILL INSTRUMENT CO., LTD			Model	PEK-130	
Drawn By	Checked By	Approved By	Description	EK01P10B-Three Phase Inverter.PrjPCB	
			Drawing NO	2	of 7
			File Name	EK01S10B-VIS.SchDoc	
			Modified Date	2017/9/25	Rev. B

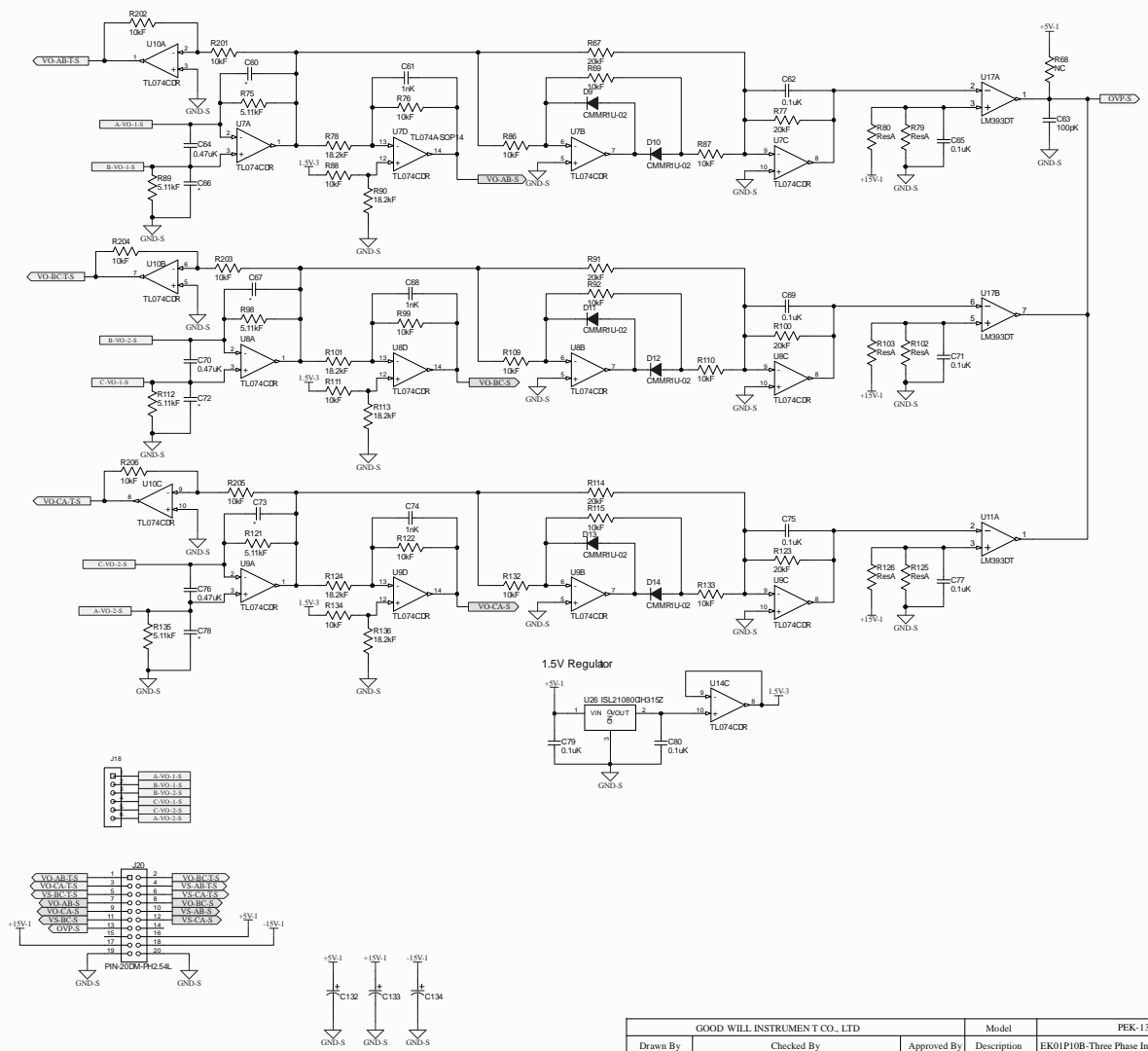
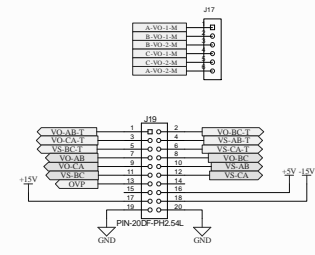
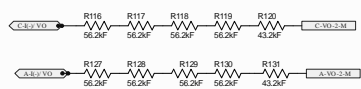
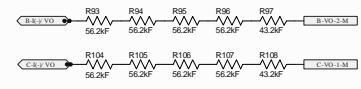
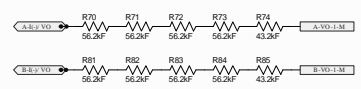


GOOD WILL INSTRUMENT CO., LTD			Model	PEK-130	
Drawn By	Checked By	Approved By	Description	EK01P10B-Three Phase Inverte.PriPCB	
			Drawing NO	3	of 7
			File Name	EK01S10B-IOS-OCP:SchDoc	
			Modified Date	2017/9/25	Rev. B

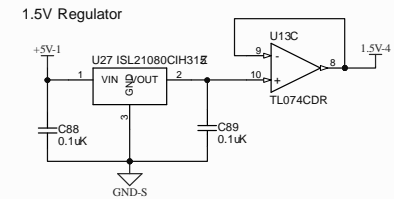
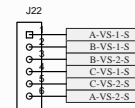
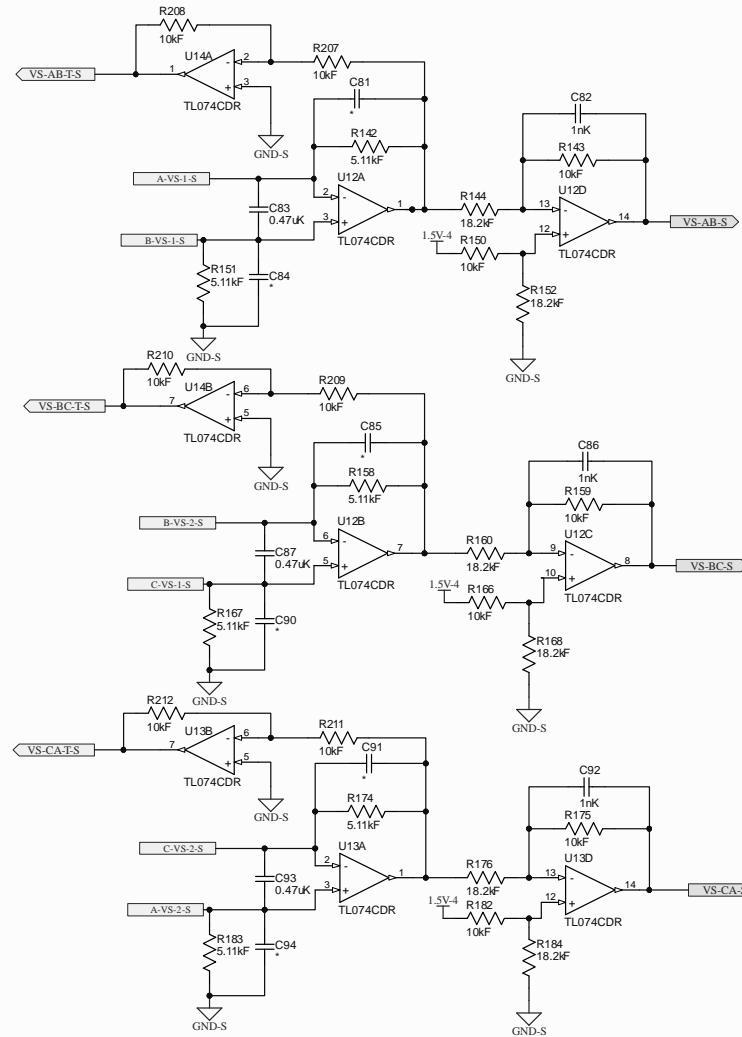
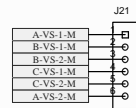
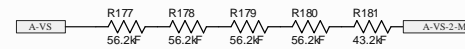
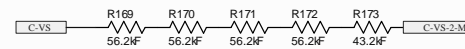
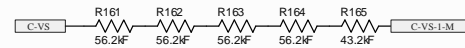
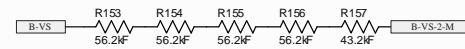
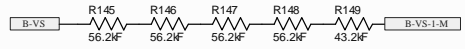
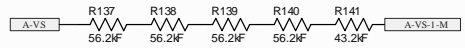




GOOD WILL INSTRUMENT CO., LTD			Model	PEK-130	
Drawn By	Checked By	Approved By	Description	EK01P10B-Three Phase Invert.PrfPCB	
			Drawing NO	4	of 7
			File Name	EK01S10B-ILS.SchDoc	
			Modified Date	2017/9/25	Rev. B



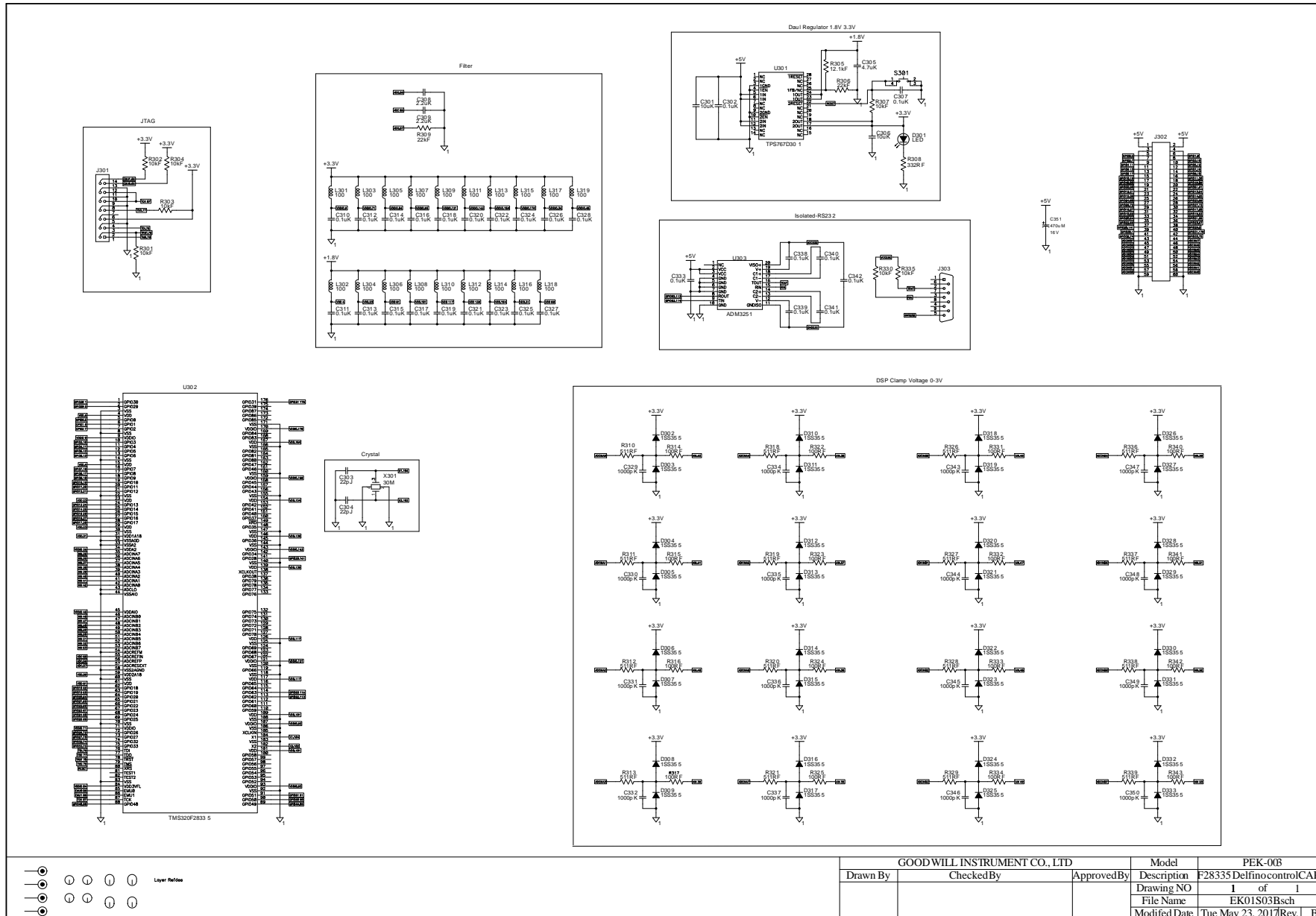
GOOD WILL INSTRUMENT CO., LTD			Model	PEK-130	
Drawn By	Checked By	Approved By	Description	EK01P10B-Three Phase Inverter.PjPCB	
			Drawing NO	5	of 7
			File Name	EK01S10B-VOS-OVP.SchDoc	
			Modified Date	2017/9/25	Rev. B



GOOD WILL INSTRUMENT CO., LTD			Model	PEK-130	
Drawn By	Checked By	Approved By	Description	EK01P10B-Three Phase Invert.PriPCB	
			Drawing NO	6	of 7
			File Name	EK01S10B-VSS.SchDoc	
			Modified Date	2017/9/25	Rev. B

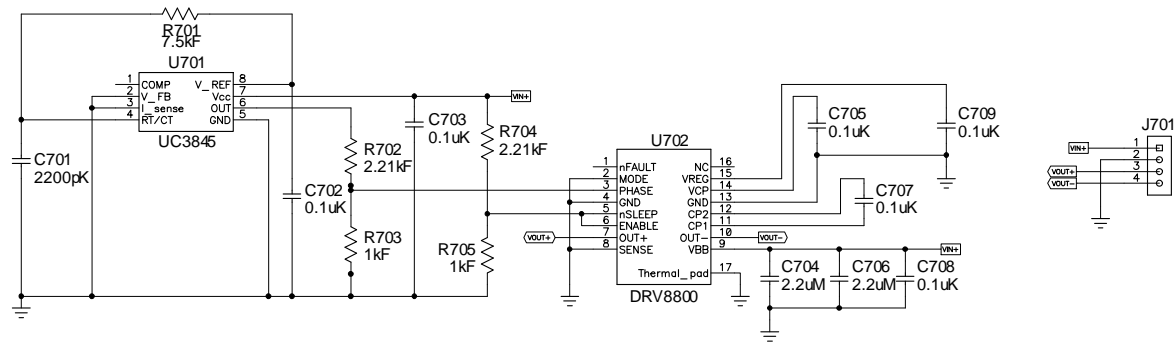


F28335 Delfino control CARD

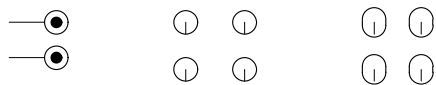


GOOD WILL INSTRUMENT CO., LTD			Model	PEK-003
Drawn By	Checked By	Approved By	Description	F28335 Delfino control CARD
			Drawing NO	1 of 1
			File Name	EK01S03Bsch
			Modified Date	Tue May 23, 2017 Rev. B

Gate Driver Power

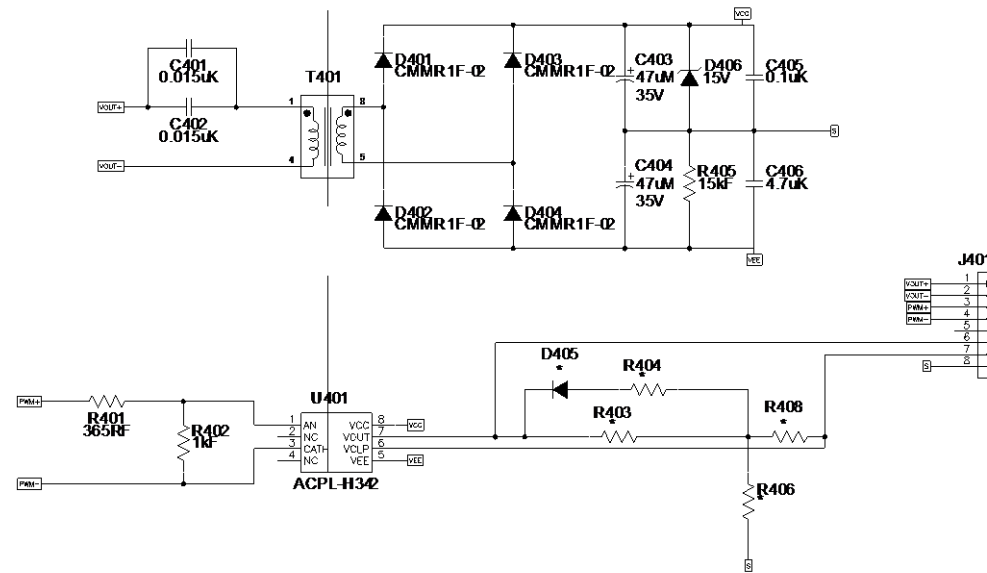


Layer Refdes

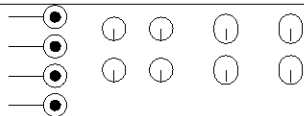


GOOD WILL INSTRUMENT CO., LTD			Model	PEK-100
Drawn By	Checked By	Approved By	Description	Gate Driver Power
			Drawing NO	1 of 1
			File Name	EK01S07A.sch
			Modified Date	Mon Mar 09, 2015   Rev. A

Gate Driver



Layer Refdes



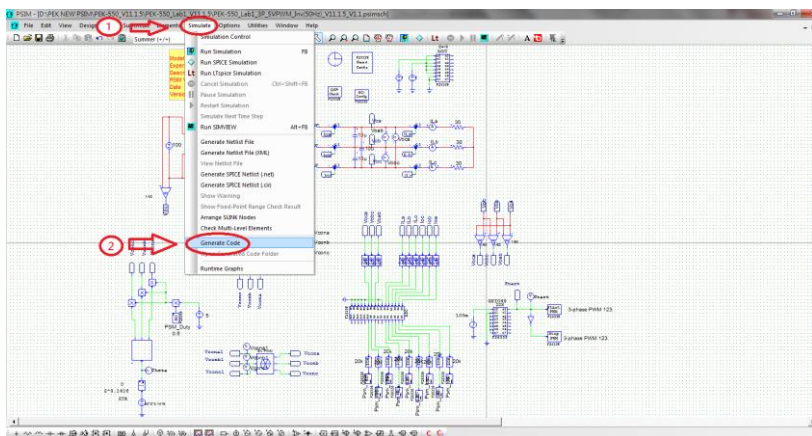
GOOD WILL INSTRUMENT CO., LTD			Model	PEK-004
Drawn By	Checked By	Approved By	Description	Gate Driver
			Drawing NO	1 of 1
			File Name	EK01S04B.sch
			Modified Date	Fri May 19, 2017   Rev. B

# 附錄 B C code 燒錄流程

本附錄以“PEK-550\_Lab1\_3P\_SVPWM\_Inv(50Hz)\_V11.1.5\_V1.1”為例進行操作說明，步驟如下。

## 操作步驟

1. 在 PSIM 程式中開啟數位電路檔案“PEK-550\_Lab1\_3P\_SVPWM\_Inv(50Hz)\_V11.1.5\_V1.1”，在“Simulate”下擊點“Generate Code”，PSIM 會自動生成 C Code，如下圖。





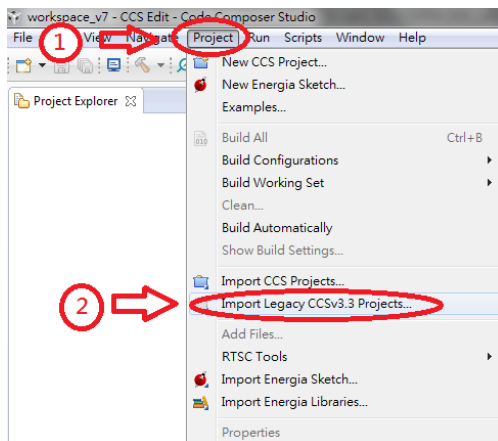
```

PSIM - D:\PEK NEW\PSIM\F28335_V11.1.5_V1\PEK_550_Lab1_V11.1.5_V1\PSIM_Lab1\PEK_550_Lab1_V11.1.5_V1\C code\PEK_550_Lab1_V11.1.5_V1
File Edit Options Window Help
D:\PEK NEW\PSIM\F28335_V11.1.5_V1\PEK_550_Lab1_V11.1.5_V1\C code\PEK_550_Lab1_V11.1.5_V1
*****
// This code is created by SimCoder Version 11.1.5.1 for F2833x Hardware Target
//
// SimCoder is copyright by PowerSim Inc., 2009-2018
//
// Date: January 13, 2020 16:55:35
//
#include <math.h>
#include "PS_Bios.h"
#pragma float DefaultType:
#definein CpuClkTimer() PS_CpuTimer()
#definein PWM_IN_CHECK // To lower PWM value setting time, comment out this line if PWM duty cyclic values are strictly limited in the range.

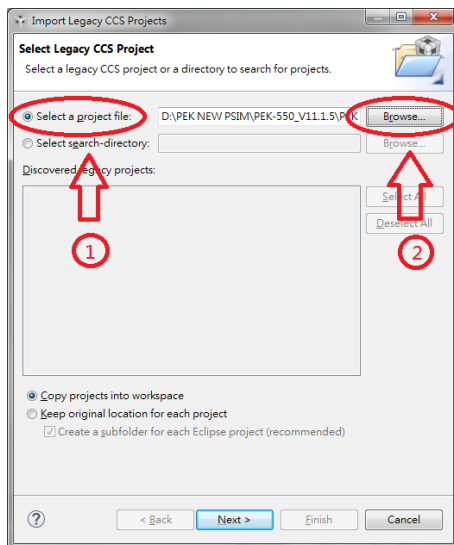
interrupt void Task0;
void Task_0();

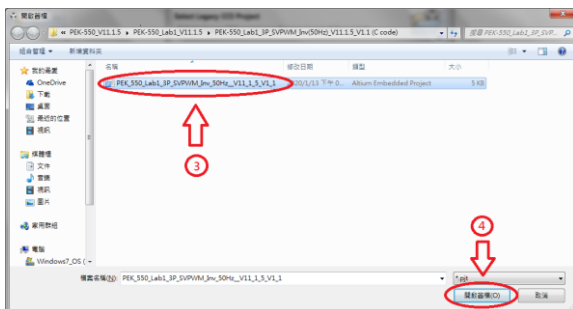
const Uint16 PSD_CpuClock = 150; // Mhz
extern DefaultType RGbHwData;
extern DefaultType RChVComa1;
extern DefaultType RChVComa1;
extern DefaultType RChVComa1;
extern DefaultType RChVComa1;
extern DefaultType RChVComa1;

PS1_RstNum aCblGcOutB[4000];
PS1_Data aCblGcOutB[1] = {0,0};
Uint16 aCblGcOutB[17] = {0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0};
Uint16 aCblGcOutB[17] = {0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0};
Uint16 aCblGcOutB = 0;
Uint16 aCblGcOutB[17] = {1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1};
char* aCblGcOutB = "0016,1,PSM_VcomA=20000,003,0016,2,PSM_VcomB=20000,003,0016,3,PSM_VcomC=20000,003,0011,1,PSM_Duty=0,003,0016,4,PSM_Vsub=20000,003,0016,5,PSM_Ba=20000,003,0016,6,PSM_Bb=20000,003,0016,7,PSM_Bc=20000,003,0016,8,PSM_Bd=20000,003,0016,9,PSM_Be=20000,003,0016,10,PSM_Bf=20000,003,0016,11,PSM_Bg=20000,003,0016,12,PSM_Bh=20000,003,0016,13,PSM_Bi=20000,003,0016,14,PSM_Bj=20000,003,0016,15,PSM_Bk=20000,003,0016,16,PSM_Bl=20000,003,0016,17,PSM_Bm=20000,003,0016,18,PSM_Bn=20000,003,0016,19,PSM_Bo=20000,003,0016,20,PSM_Bp=20000,003,0016,21,PSM_Bq=20000,003,0016,22,PSM_Br=20000,003,0016,23,PSM_Bs=20000,003,0016,24,PSM_Bt=20000,003,0016,25,PSM_Bu=20000,003,0016,26,PSM_Bv=20000,003,0016,27,PSM_Bw=20000,003,0016,28,PSM_Bx=20000,003,0016,29,PSM_By=20000,003,0016,30,PSM_Bz=20000,003,0016,31,PSM_B0=20000,003,0016,32,PSM_B1=20000,003,0016,33,PSM_B2=20000,003,0016,34,PSM_B3=20000,003,0016,35,PSM_B4=20000,003,0016,36,PSM_B5=20000,003,0016,37,PSM_B6=20000,003,0016,38,PSM_B7=20000,003,0016,39,PSM_B8=20000,003,0016,40,PSM_B9=20000,003,0016,41,PSM_BA=20000,003,0016,42,PSM_BB=20000,003,0016,43,PSM_BC=20000,003,0016,44,PSM_BD=20000,003,0016,45,PSM_BE=20000,003,0016,46,PSM_BF=20000,003,0016,47,PSM_BG=20000,003,0016,48,PSM_BH=20000,003,0016,49,PSM_BI=20000,003,0016,50,PSM_BJ=20000,003,0016,51,PSM_BK=20000,003,0016,52,PSM_BL=20000,003,0016,53,PSM_BM=20000,003,0016,54,PSM_BN=20000,003,0016,55,PSM_BO=20000,003,0016,56,PSM_BP=20000,003,0016,57,PSM_BQ=20000,003,0016,58,PSM_BR=20000,003,0016,59,PSM_BS=20000,003,0016,60,PSM_BT=20000,003,0016,61,PSM_BU=20000,003,0016,62,PSM_BV=20000,003,0016,63,PSM_BW=20000,003,0016,64,PSM_BX=20000,003,0016,65,PSM_BY=20000,003,0016,66,PSM_BZ=20000,003,0016,67,PSM_B00=20000,003,0016,68,PSM_B01=20000,003,0016,69,PSM_B02=20000,003,0016,70,PSM_B03=20000,003,0016,71,PSM_B04=20000,003,0016,72,PSM_B05=20000,003,0016,73,PSM_B06=20000,003,0016,74,PSM_B07=20000,003,0016,75,PSM_B08=20000,003,0016,76,PSM_B09=20000,003,0016,77,PSM_B0A=20000,003,0016,78,PSM_B0B=20000,003,0016,79,PSM_B0C=20000,003,0016,80,PSM_B0D=20000,003,0016,81,PSM_B0E=20000,003,0016,82,PSM_B0F=20000,003,0016,83,PSM_B10=20000,003,0016,84,PSM_B11=20000,003,0016,85,PSM_B12=20000,003,0016,86,PSM_B13=20000,003,0016,87,PSM_B14=20000,003,0016,88,PSM_B15=20000,003,0016,89,PSM_B16=20000,003,0016,90,PSM_B17=20000,003,0016,91,PSM_B18=20000,003,0016,92,PSM_B19=20000,003,0016,93,PSM_B1A=20000,003,0016,94,PSM_B1B=20000,003,0016,95,PSM_B1C=20000,003,0016,96,PSM_B1D=20000,003,0016,97,PSM_B1E=20000,003,0016,98,PSM_B1F=20000,003,0016,99,PSM_B20=20000,003,0016,100,PSM_B21=20000,003,0016,101,PSM_B22=20000,003,0016,102,PSM_B23=20000,003,0016,103,PSM_B24=20000,003,0016,104,PSM_B25=20000,003,0016,105,PSM_B26=20000,003,0016,106,PSM_B27=20000,003,0016,107,PSM_B28=20000,003,0016,108,PSM_B29=20000,003,0016,109,PSM_B2A=20000,003,0016,110,PSM_B2B=20000,003,0016,111,PSM_B2C=20000,003,0016,112,PSM_B2D=20000,003,0016,113,PSM_B2E=20000,003,0016,114,PSM_B2F=20000,003,0016,115,PSM_B30=20000,003,0016,116,PSM_B31=20000,003,0016,117,PSM_B32=20000,003,0016,118,PSM_B33=20000,003,0016,119,PSM_B34=20000,003,0016,120,PSM_B35=20000,003,0016,121,PSM_B36=20000,003,0016,122,PSM_B37=20000,003,0016,123,PSM_B38=20000,003,0016,124,PSM_B39=20000,003,0016,125,PSM_B3A=20000,003,0016,126,PSM_B3B=20000,003,0016,127,PSM_B3C=20000,003,0016,128,PSM_B3D=20000,003,0016,129,PSM_B3E=20000,003,0016,130,PSM_B3F=20000,003,0016,131,PSM_B40=20000,003,0016,132,PSM_B41=20000,003,0016,133,PSM_B42=20000,003,0016,134,PSM_B43=20000,003,0016,135,PSM_B44=20000,003,0016,136,PSM_B45=20000,003,0016,137,PSM_B46=20000,003,0016,138,PSM_B47=20000,003,0016,139,PSM_B48=20000,003,0016,140,PSM_B49=20000,003,0016,141,PSM_B4A=20000,003,0016,142,PSM_B4B=20000,003,0016,143,PSM_B4C=20000,003,0016,144,PSM_B4D=20000,003,0016,145,PSM_B4E=20000,003,0016,146,PSM_B4F=20000,003,0016,147,PSM_B50=20000,003,0016,148,PSM_B51=20000,003,0016,149,PSM_B52=20000,003,0016,150,PSM_B53=20000,003,0016,151,PSM_B54=20000,003,0016,152,PSM_B55=20000,003,0016,153,PSM_B56=20000,003,0016,154,PSM_B57=20000,003,0016,155,PSM_B58=20000,003,0016,156,PSM_B59=20000,003,0016,157,PSM_B5A=20000,003,0016,158,PSM_B5B=20000,003,0016,159,PSM_B5C=20000,003,0016,160,PSM_B5D=20000,003,0016,161,PSM_B5E=20000,003,0016,162,PSM_B5F=20000,003,0016,163,PSM_B60=20000,003,0016,164,PSM_B61=20000,003,0016,165,PSM_B62=20000,003,0016,166,PSM_B63=20000,003,0016,167,PSM_B64=20000,003,0016,168,PSM_B65=20000,003,0016,169,PSM_B66=20000,003,0016,170,PSM_B67=20000,003,0016,171,PSM_B68=20000,003,0016,172,PSM_B69=20000,003,0016,173,PSM_B6A=20000,003,0016,174,PSM_B6B=20000,003,0016,175,PSM_B6C=20000,003,0016,176,PSM_B6D=20000,003,0016,177,PSM_B6E=20000,003,0016,178,PSM_B6F=20000,003,0016,179,PSM_B70=20000,003,0016,180,PSM_B71=20000,003,0016,181,PSM_B72=20000,003,0016,182,PSM_B73=20000,003,0016,183,PSM_B74=20000,003,0016,184,PSM_B75=20000,003,0016,185,PSM_B76=20000,003,0016,186,PSM_B77=20000,003,0016,187,PSM_B78=20000,003,0016,188,PSM_B79=20000,003,0016,189,PSM_B7A=20000,003,0016,190,PSM_B7B=20000,003,0016,191,PSM_B7C=20000,003,0016,192,PSM_B7D=20000,003,0016,193,PSM_B7E=20000,003,0016,194,PSM_B7F=20000,003,0016,195,PSM_B80=20000,003,0016,196,PSM_B81=20000,003,0016,197,PSM_B82=20000,003,0016,198,PSM_B83=20000,003,0016,199,PSM_B84=20000,003,0016,200,PSM_B85=20000,003,0016,201,PSM_B86=20000,003,0016,202,PSM_B87=20000,003,0016,203,PSM_B88=20000,003,0016,204,PSM_B89=20000,003,0016,205,PSM_B8A=20000,003,0016,206,PSM_B8B=20000,003,0016,207,PSM_B8C=20000,003,0016,208,PSM_B8D=20000,003,0016,209,PSM_B8E=20000,003,0016,210,PSM_B8F=20000,003,0016,211,PSM_B90=20000,003,0016,212,PSM_B91=20000,003,0016,213,PSM_B92=20000,003,0016,214,PSM_B93=20000,003,0016,215,PSM_B94=20000,003,0016,216,PSM_B95=20000,003,0016,217,PSM_B96=20000,003,0016,218,PSM_B97=20000,003,0016,219,PSM_B98=20000,003,0016,220,PSM_B99=20000,003,0016,221,PSM_B9A=20000,003,0016,222,PSM_B9B=20000,003,0016,223,PSM_B9C=20000,003,0016,224,PSM_B9D=20000,003,0016,225,PSM_B9E=20000,003,0016,226,PSM_B9F=20000,003,0016,227,PSM_BA0=20000,003,0016,228,PSM_BA1=20000,003,0016,229,PSM_BA2=20000,003,0016,230,PSM_BA3=20000,003,0016,231,PSM_BA4=20000,003,0016,232,PSM_BA5=20000,003,0016,233,PSM_BA6=20000,003,0016,234,PSM_BA7=20000,003,0016,235,PSM_BA8=20000,003,0016,236,PSM_BA9=20000,003,0016,237,PSM_BAA=20000,003,0016,238,PSM_BAB=20000,003,0016,239,PSM_BAC=20000,003,0016,240,PSM_BAD=20000,003,0016,241,PSM_BAE=20000,003,0016,242,PSM_BAF=20000,003,0016,243,PSM_BB0=20000,003,0016,244,PSM_BB1=20000,003,0016,245,PSM_BB2=20000,003,0016,246,PSM_BB3=20000,003,0016,247,PSM_BB4=20000,003,0016,248,PSM_BB5=20000,003,0016,249,PSM_BB6=20000,003,0016,250,PSM_BB7=20000,003,0016,251,PSM_BB8=20000,003,0016,252,PSM_BB9=20000,003,0016,253,PSM_BBA=20000,003,0016,254,PSM_BBB=20000,003,0016,255,PSM_BBC=20000,003,0016,256,PSM_BBD=20000,003,0016,257,PSM_BBE=20000,003,0016,258,PSM_BBF=20000,003,0016,259,PSM_BB0=20000,003,0016,260,PSM_BB1=20000,003,0016,261,PSM_BB2=20000,003,0016,262,PSM_BB3=20000,003,0016,263,PSM_BB4=20000,003,0016,264,PSM_BB5=20000,003,0016,265,PSM_BB6=20000,003,0016,266,PSM_BB7=20000,003,0016,267,PSM_BB8=20000,003,0016,268,PSM_BB9=20000,003,0016,269,PSM_BBA=20000,003,0016,270,PSM_BBB=20000,003,0016,271,PSM_BBC=20000,003,0016,272,PSM_BBD=20000,003,0016,273,PSM_BBE=20000,003,0016,274,PSM_BBF=20000,003,0016,275,PSM_BB0=20000,003,0016,276,PSM_BB1=20000,003,0016,277,PSM_BB2=20000,003,0016,278,PSM_BB3=20000,003,0016,279,PSM_BB4=20000,003,0016,280,PSM_BB5=20000,003,0016,281,PSM_BB6=20000,003,0016,282,PSM_BB7=20000,003,0016,283,PSM_BB8=20000,003,0016,284,PSM_BB9=20000,003,0016,285,PSM_BBA=20000,003,0016,286,PSM_BBB=20000,003,0016,287,PSM_BBC=20000,003,0016,288,PSM_BBD=20000,003,0016,289,PSM_BBE=20000,003,0016,290,PSM_BBF=20000,003,0016,291,PSM_BB0=20000,003,0016,292,PSM_BB1=20000,003,0016,293,PSM_BB2=20000,003,0016,294,PSM_BB3=20000,003,0016,295,PSM_BB4=20000,003,0016,296,PSM_BB5=20000,003,0016,297,PSM_BB6=20000,003,0016,298,PSM_BB7=20000,003,0016,299,PSM_BB8=20000,003,0016,300,PSM_BB9=20000,003,0016,301,PSM_BBA=20000,003,0016,302,PSM_BBB=20000,003,0016,303,PSM_BBC=20000,003,0016,304,PSM_BBD=20000,003,0016,305,PSM_BBE=20000,003,0016,306,PSM_BBF=20000,003,0016,307,PSM_BB0=20000,003,0016,308,PSM_BB1=20000,003,0016,309,PSM_BB2=20000,003,0016,310,PSM_BB3=20000,003,0016,311,PSM_BB4=20000,003,0016,312,PSM_BB5=20000,003,0016,313,PSM_BB6=20000,003,0016,314,PSM_BB7=20000,003,0016,315,PSM_BB8=20000,003,0016,316,PSM_BB9=20000,003,0016,317,PSM_BBA=20000,003,0016,318,PSM_BBB=20000,003,0016,319,PSM_BBC=20000,003,0016,320,PSM_BBD=20000,003,0016,321,PSM_BBE=20000,003,0016,322,PSM_BBF=20000,003,0016,323,PSM_BB0=20000,003,0016,324,PSM_BB1=20000,003,0016,325,PSM_BB2=20000,003,0016,326,PSM_BB3=20000,003,0016,327,PSM_BB4=20000,003,0016,328,PSM_BB5=20000,003,0016,329,PSM_BB6=20000,003,0016,330,PSM_BB7=20000,003,0016,331,PSM_BB8=20000,003,0016,332,PSM_BB9=20000,003,0016,333,PSM_BBA=20000,003,0016,334,PSM_BBB=20000,003,0016,335,PSM_BBC=20000,003,0016,336,PSM_BBD=20000,003,0016,337,PSM_BBE=20000,003,0016,338,PSM_BBF=20000,003,0016,339,PSM_BB0=20000,003,0016,340,PSM_BB1=20000,003,0016,341,PSM_BB2=20000,003,0016,342,PSM_BB3=20000,003,0016,343,PSM_BB4=20000,003,0016,344,PSM_BB5=20000,003,0016,345,PSM_BB6=20000,003,0016,346,PSM_BB7=20000,003,0016,347,PSM_BB8=20000,003,0016,348,PSM_BB9=20000,003,0016,349,PSM_BBA=20000,003,0016,350,PSM_BBB=20000,003,0016,351,PSM_BBC=20000,003,0016,352,PSM_BBD=20000,003,0016,353,PSM_BBE=20000,003,0016,354,PSM_BBF=20000,003,0016,355,PSM_BB0=20000,003,0016,356,PSM_BB1=20000,003,0016,357,PSM_BB2=20000,003,0016,358,PSM_BB3=20000,003,0016,359,PSM_BB4=20000,003,0016,360,PSM_BB5=20000,003,0016,361,PSM_BB6=20000,003,0016,362,PSM_BB7=20000,003,0016,363,PSM_BB8=20000,003,0016,364,PSM_BB9=20000,003,0016,365,PSM_BBA=20000,003,0016,366,PSM_BBB=20000,003,0016,367,PSM_BBC=20000,003,0016,368,PSM_BBD=20000,003,0016,369,PSM_BBE=20000,003,0016,370,PSM_BBF=20000,003,0016,371,PSM_BB0=20000,003,0016,372,PSM_BB1=20000,003,0016,373,PSM_BB2=20000,003,0016,374,PSM_BB3=20000,003,0016,375,PSM_BB4=20000,003,0016,376,PSM_BB5=20000,003,0016,377,PSM_BB6=20000,003,0016,378,PSM_BB7=20000,003,0016,379,PSM_BB8=20000,003,0016,380,PSM_BB9=20000,003,0016,381,PSM_BBA=20000,003,0016,382,PSM_BBB=20000,003,0016,383,PSM_BBC=20000,003,0016,384,PSM_BBD=20000,003,0016,385,PSM_BBE=20000,003,0016,386,PSM_BBF=20000,003,0016,387,PSM_BB0=20000,003,0016,388,PSM_BB1=20000,003,0016,389,PSM_BB2=20000,003,0016,390,PSM_BB3=20000,003,0016,391,PSM_BB4=20000,003,0016,392,PSM_BB5=20000,003,0016,393,PSM_BB6=20000,003,0016,394,PSM_BB7=20000,003,0016,395,PSM_BB8=20000,003,0016,396,PSM_BB9=20000,003,0016,397,PSM_BBA=20000,003,0016,398,PSM_BBB=20000,003,0016,399,PSM_BBC=20000,003,0016,400,PSM_BBD=20000,003,0016,401,PSM_BBE=20000,003,0016,402,PSM_BBF=20000,003,0016,403,PSM_BB0=20000,003,0016,404,PSM_BB1=20000,003,0016,405,PSM_BB2=20000,003,0016,406,PSM_BB3=20000,003,0016,407,PSM_BB4=20000,003,0016,408,PSM_BB5=20000,003,0016,409,PSM_BB6=20000,003,0016,410,PSM_BB7=20000,003,0016,411,PSM_BB8=20000,003,0016,412,PSM_BB9=20000,003,0016,413,PSM_BBA=20000,003,0016,414,PSM_BBB=20000,003,0016,415,PSM_BBC=20000,003,0016,416,PSM_BBD=20000,003,0016,417,PSM_BBE=20000,003,0016,418,PSM_BBF=20000,003,0016,419,PSM_BB0=20000,003,0016,420,PSM_BB1=20000,003,0016,421,PSM_BB2=20000,003,0016,422,PSM_BB3=20000,003,0016,423,PSM_BB4=20000,003,0016,424,PSM_BB5=20000,003,0016,425,PSM_BB6=20000,003,0016,426,PSM_BB7=20000,003,0016,427,PSM_BB8=20000,003,0016,428,PSM_BB9=20000,003,0016,429,PSM_BBA=20000,003,0016,430,PSM_BBB=20000,003,0016,431,PSM_BBC=20000,003,0016,432,PSM_BBD=20000,003,0016,433,PSM_BBE=20000,003,0016,434,PSM_BBF=20000,003,0016,435,PSM_BB0=20000,003,0016,436,PSM_BB1=20000,003,0016,437,PSM_BB2=20000,003,0016,438,PSM_BB3=20000,003,0016,439,PSM_BB4=20000,003,0016,440,PSM_BB5=20000,003,0016,441,PSM_BB6=20000,003,0016,442,PSM_BB7=20000,003,0016,443,PSM_BB8=20000,003,0016,444,PSM_BB9=20000,003,0016,445,PSM_BBA=20000,003,0016,446,PSM_BBB=20000,003,0016,447,PSM_BBC=20000,003,0016,448,PSM_BBD=20000,003,0016,449,PSM_BBE=20000,003,0016,450,PSM_BBF=20000,003,0016,451,PSM_BB0=20000,003,0016,452,PSM_BB1=20000,003,0016,453,PSM_BB2=20000,003,0016,454,PSM_BB3=20000,003,0016,455,PSM_BB4=20000,003,0016,456,PSM_BB5=20000,003,0016,457,PSM_BB6=20000,003,0016,458,PSM_BB7=20000,003,0016,459,PSM_BB8=20000,003,0016,460,PSM_BB9=20000,003,0016,461,PSM_BBA=20000,003,0016,462,PSM_BBB=20000,003,0016,463,PSM_BBC=20000,003,0016,464,PSM_BBD=20000,003,0016,465,PSM_BBE=20000,003,0016,466,PSM_BBF=20000,003,0016,467,PSM_BB0=20000,003,0016,468,PSM_BB1=20000,003,0016,469,PSM_BB2=20000,003,0016,470,PSM_BB3=20000,003,0016,471,PSM_BB4=20000,003,0016,472,PSM_BB5=20000,003,0016,473,PSM_BB6=20000,003,0016,474,PSM_BB7=20000,003,0016,475,PSM_BB8=20000,003,0016,476,PSM_BB9=20000,003,0016,477,PSM_BBA=20000,003,0016,478,PSM_BBB=20000,003,0016,479,PSM_BBC=20000,003,0016,480,PSM_BBD=20000,003,0016,481,PSM_BBE=20000,003,0016,482,PSM
```

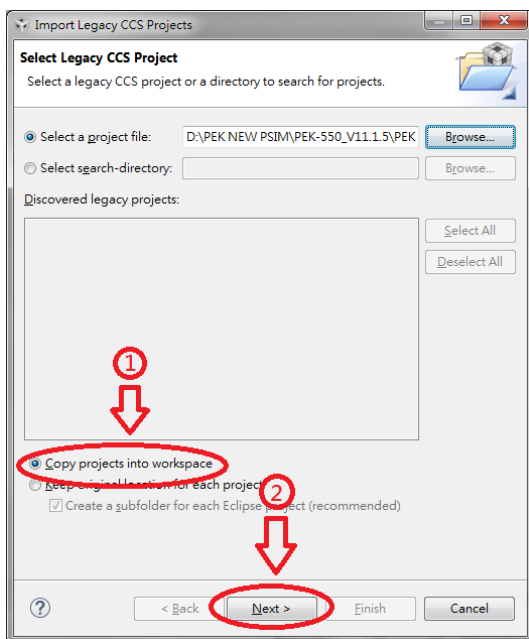


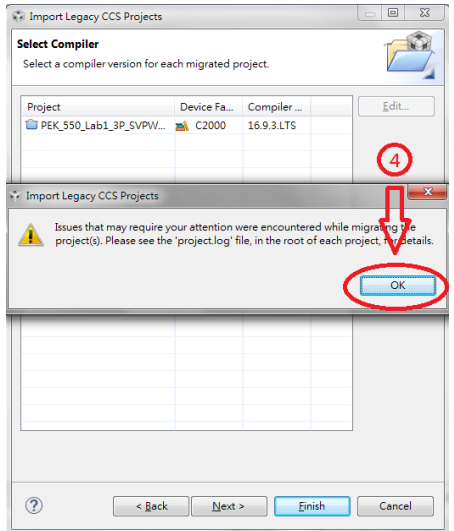
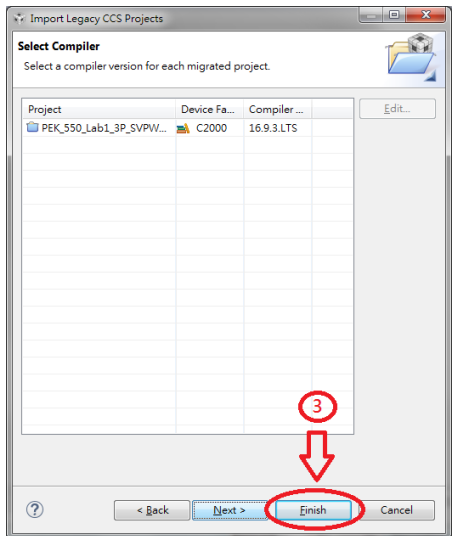
4. 在“Select a project file”中，擊點“Browse”，尋找 C Code 所在的資料夾並選取副檔名為.pjt 的檔案，如下圖。



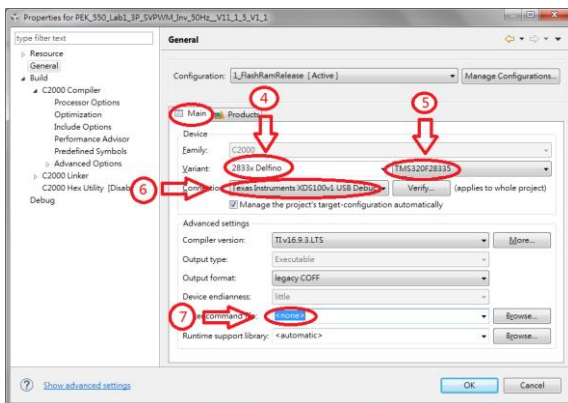
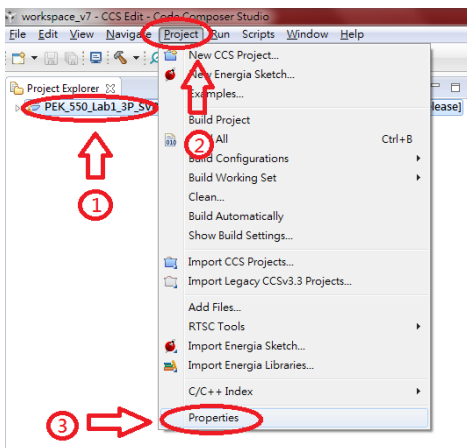


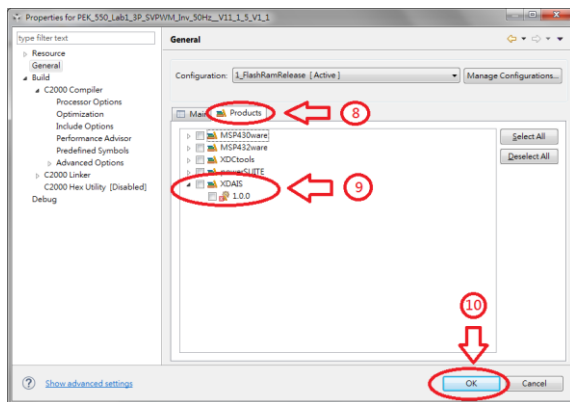
5. 選擇“Copy projects into workspace”後，擊點“Next”後，再擊點“Finish”，即可將 C Code 導入到 CCS 程式中，如下圖。



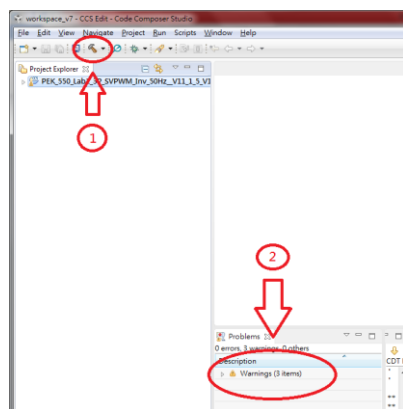


6. 選取 C Code 檔案後，在 "Project" 下選擇 "Properties"，設定如下：
  - (1) 在 Main 中 Variant 選取 "2833X Delfino 中的 TMS320F28335"
  - (2) 在 Main 中 Connection 選取 "Texas Instruments XDS100v1 USB Debug Probe"
  - (3) 在 Main 中 Linker command file 選取 "none"
  - (4) 在 Products 中將 XDAIS 取消選擇 (如果你的 CCS 版本無此選項，則不須理會)



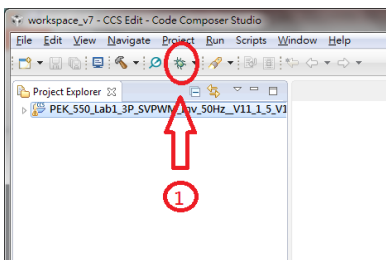


- 設定完畢後，擊點“Build”，進行編譯。編譯結束，如無 Errors，代表此程式可進行燒錄，Warnings 不影響燒錄，可忽略。

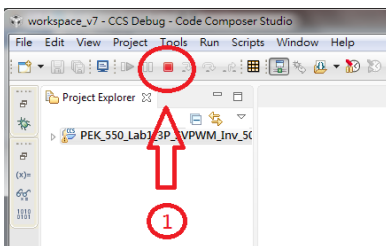


- 將 PEK-006 分別連接到 PC 與 PEK 模塊上，之後擊點“Debug”，進行燒錄。

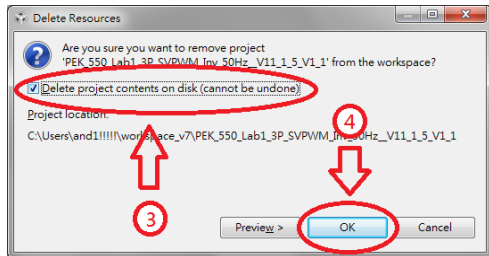
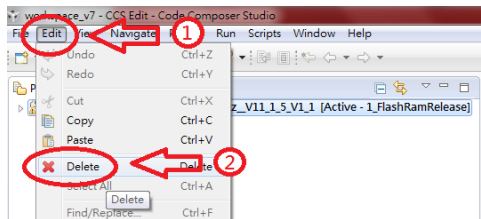




9. 燒錄結束後，擊點“Terminate”，並移除 PEK-006，如此即完成燒錄程序。



10. 如需刪除檔案，選取 C Code 檔案後，在 “Edit” 下選擇 “Delete”，勾選 “Delete project contents on disk” 後，擊點 “OK” 後完成。





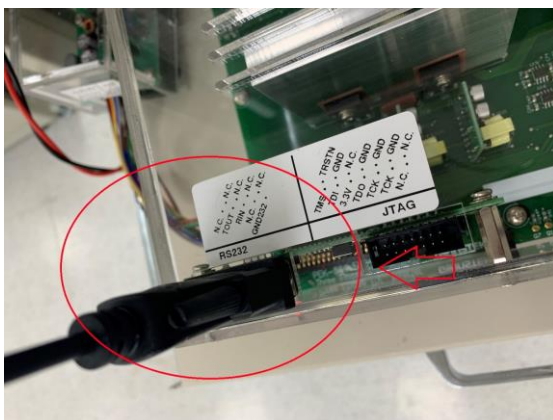
# 附錄 C RS232 連線

## 操作步驟

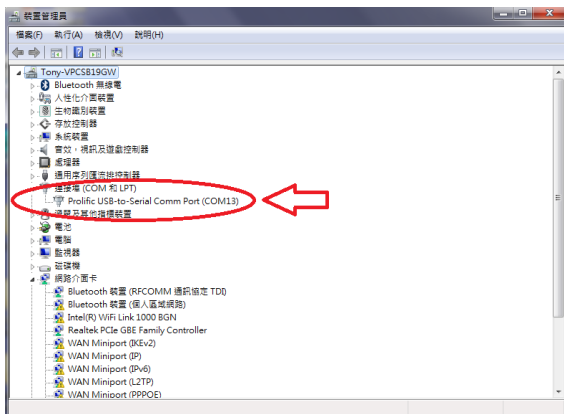
1. 將 PEK-005A 接至 PEK 模塊，確保 DSP 工作狀態正常。



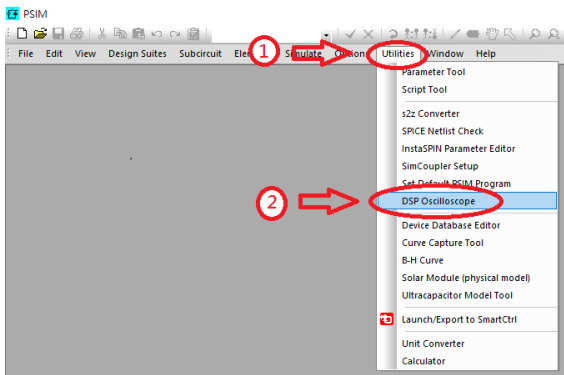
2. 將 RS232 一端連接至電腦 PC，另一端接到 PEK 的 RS232 端口。



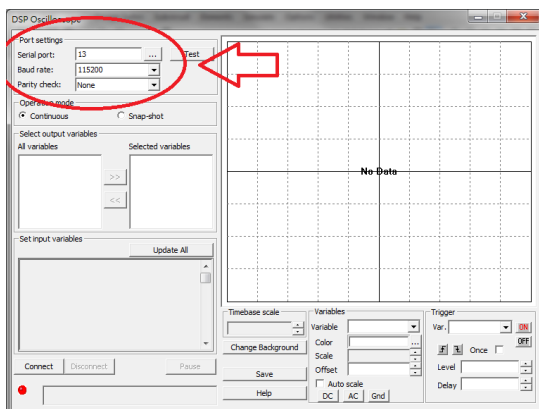
3. 開啟電腦的裝置管理員，確認 RS232 所使用的連接埠(COM)位置。



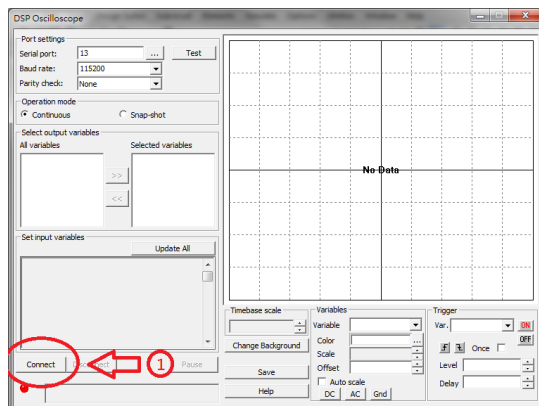
4. 開啟 PSIM 程式，點選上方選單 Utilities 中 DSP Oscilloscope 選項。



5. Port settings 的設定如下:
  - (1) Serial port 選取 RS232 所使用的連接埠 (COM)位置。
  - (2) Baud rate 設定為 115200。
  - (3) Parity check 設定為 None。



6. 設定完成後點選 **Connect** 進行 RS232 連線。



7. 正確連線後，即可看到 PSIM 電路內所規劃的 **output variables** 與 **input variables**。

