

# 第4章 功率因數修正器

本章將針對試題 11600-105202 功率因數修正器進行解析，包含試題說明、動作要求、電路原理和實體製作，使應檢人熟悉理論分析和實務操作。

## 4-1 試題說明

1. 本試題目的為評量考生對功率因數修正器(power factor corrector)的技術能力，測試考生於電路製作與功能檢測驗證能力。
2. 依照試題要求之線圈匝數與電感值繞製電路所需之電感器，並量測該電感器之參數特性。
3. 依電路圖、元件佈置圖(元件面)與佈線圖(銅箔面)按圖並依電路鋸接規則進行電路鋸接工作。
4. 完成電路板與元件鋸接後，考生須依試題要求項目，完成電路測試點波形量測與性能數據記錄。
5. 監評人員於評審時將針對考生完成數據紀錄(表 4-6，表 4-33)，抽查三個以上之數據，請考生現場進行量測，以查核紀錄數據是否相符。
6. 本題之電壓與電流波形量測共有 A、B、C三個測試條件，監評人員現場指定一個測試條件，考生須在該測試條件下實際量測波形，並進行描繪紀錄。

## 4-2 動作要求

1. 先將自耦變壓器電壓調整為 0V，並連接自耦變壓器於電路輸入端，再連接直流輔助電源 Vcc，提供電力給控制 IC。
2. 先連接一個  $1600\Omega/150W$  功率電阻於電路輸出端，並將示波器連接於輸出端，再將自耦變壓器插入電源插座，調整電壓自耦變壓器後，注意電路板紅色 LED 亮起(請注意避免感電)，將自耦變壓器之輸出電壓逐漸調至 110V，觀察輸出電壓，此時之輸出功率為 25W。

3. 當電路正常工作時，維持示波器的測量，再於電路輸出端並接一個  $1600\Omega/150W$  功率電阻，得到等效  $800\Omega/150W$  之輸出端功率電阻，並以示波器觀察輸出電壓，此時之輸出功率為  $50W$ 。
4. 電路正常工作時，再於輸出端並接一個  $800\Omega/150W$  功率電阻，得到等效  $400\Omega/150W$  之輸出端功率電阻，並以示波器觀察輸出電壓，此時之輸出功率為  $100W$ 。
5. 調整輸出端功率電阻時，電路輸出端平均電壓皆應為  $200V(\pm 5\%)$ 。亦即當輸出功率  $25W$ 、 $50W$  或者  $100W$  時，輸出電壓皆能保持於  $200V(\pm 5\%)$ 。
6. 調整示波器設定，使輸出電壓波形占螢幕 2 格以上垂直刻度，以便量測電路輸出電壓漣波，其電壓漣波峰對峰值應小於  $6V$ (不含開關切換所產生之尖波)，顯示波形須呈現  $2\sim 3$  個週期。
7. 將示波器連接於輸入端，觀察輸入電壓以及輸入電流等波形。

### 4-3 電路原理

一般傳統電子設備之電源，利用全橋式二極體整流電路，將市電之交流電壓轉換成直流電壓，為了降低直流輸出電壓的漣波成分，經由並聯大容量之電容，得到趨近於交流電壓峰值的直流電壓，以提供後級較穩定的直流電壓。

雖然具有架構簡單、堅固、成本低、不必控制等優點，不過全橋式整流電路之二極體僅於交流電源電壓高於輸出電容電壓時才會導通，導通的時間相當短。在交流輸入電流的部分，將形成一脈衝電流，失真程度相當大且含有大量諧波成分及雜訊干擾，使得線路傳輸損失增加，造成功率因數降低(約  $0.5\sim 0.7$  之間)，電磁干擾的問題，為了改善上述傳統全橋式二極體整流濾波方式之缺點，逐漸發展出各種功因修正電路(Power Factor Correction，簡稱 PFC)。

功因修正器的主要作用是讓電壓與電流的相位相同且使負載近似於電阻性，一般可分為被動式(Passive)功因修正電路與主動式(Active)功因修正電路。被動式功因修正電路優點如下：

1. 電路構造簡單。
2. 成本低。
3. 電磁干擾(Electromagnetic Interference，簡稱 EMI)較低。

被動式功因修正電路缺點如下：

1. 體積大。
2. 重量重。
3. 只能濾除低次諧波。
4. 功率因數校正僅達 0.75~0.8，修正效果不佳。
5. 不符合目前重量輕、體積小的發展方向。

主動功率因數修正或有源功率因數修正(active PFC)是指可調整負載的輸入電流，改善功率因數的電力電子系統，其主要目的是使輸入電流接近純電阻式負載的電流，使其視在功率等於有效功率。理想狀態下其電壓和電流相位相同，而其產生或消耗的無效功率為 0，使電源端以最有效率的方式傳遞能量給負載。

主動式功因修正電路是利用適當的迴授補償來控制主動式開關的切換狀態，進行儲能元件能量的儲存與釋放，使得輸入電流追隨命令電流，以得到一個接近正弦波且與輸入電源同相位的輸入電流，來達成功率因數修正之目的。市售的主動式功因修正器架構上大多為升壓式的電路架構，其優點如下：

1. 體積小。
2. 重量輕。
3. 功因改善可達到 0.9。

功率因數  $pf$ (power factor)定義如下：

$$0 \leq pf = \cos \theta \leq 1$$

$$S = P + jQ = \sqrt{P^2 + Q^2} \angle \tan^{-1}\left(\frac{Q}{P}\right) = |S| \angle \theta$$

其中：

$S$ ：複數功率(VA)

$P$ ：實功率(有效功率)(W)

$Q$ ：虛功率(無效功率)(Var)

$|S|$ ：視在功率(VA)

$\theta$ ：功率因數角(功因角)(°)

本試題即為升壓式主動功因修正器，將 110V 之交流輸入電壓經由整流器轉換成直流電壓 155.56V，再升高為 200V 後送給負載(功率電阻)輸出，同時將功率因數改善至 0.9 以上，電路如圖 4-1 所示，供給材料表如表 4-1 所示。

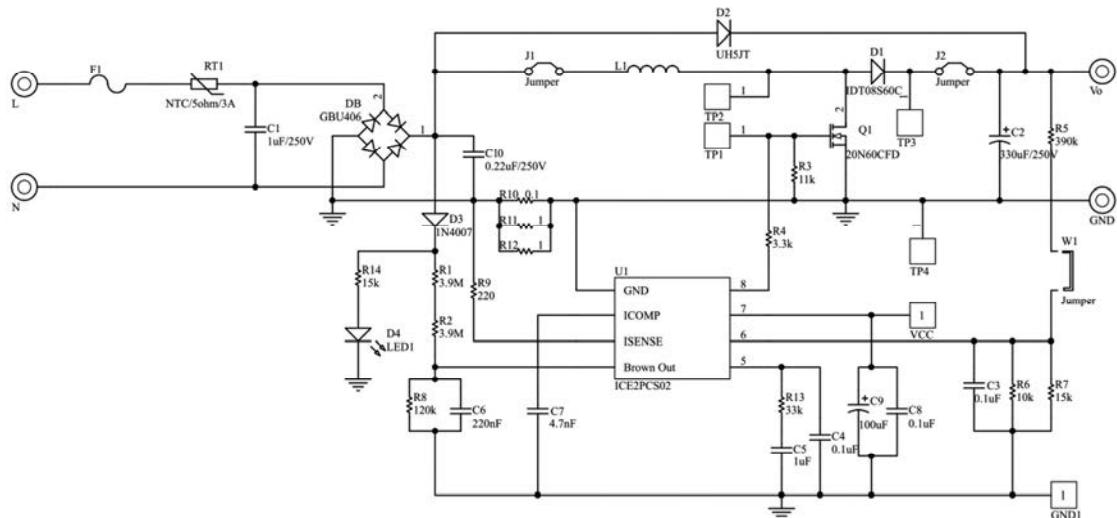


圖 4-1 功率因數修正器：電路圖

表 4-1 功率因數修正器：供給材料表

項次	代碼	名稱	規格	單位	數量	備註
1	R1、R2	電阻器	$3.9M\Omega \pm 5\%$ 、1/4W	只	2	
2	R3	電阻器	$11k\Omega \pm 5\%$ 、1/4W	只	1	
3	R4	電阻器	$3.3\Omega \pm 5\%$ 、1/4W	只	1	
4	R5	電阻器	$390k\Omega \pm 1\%$ 、1/4W	只	1	
5	R6	電阻器	$10k\Omega \pm 1\%$ 、1/4W	只	1	
6	R7、R14	電阻器	$15k\Omega \pm 1\%$ 、1/4W	只	2	
7	R8	電阻器	$120k\Omega \pm 5\%$ 、1/4W	只	1	
8	R9	電阻器	$220\Omega \pm 5\%$ 、1/4W	只	1	
9	R10	電阻器	$0.1\Omega \pm 5\%$ 、2W	只	1	
10	R11、R12	電阻器	$1\Omega \pm 5\%$ 、2W	只	2	
11	R13	電阻器	$33k\Omega \pm 5\%$ 、1/4W	只	1	
12	RT1	湧浪電流保護器	NTC/5Ω/3A	只	1	
13	C1	多層陶瓷電容器	1μF/275VAC	只	1	

項次	代碼	名稱	規格	單位	數量	備註
14	C2	電解電容器	330μF/250V	只	1	
15	C3、C4、C8	陶瓷電容器	0.1μF/50V	只	3	
16	C5	積層電容器	1μF /50V	只	1	
17	C6	陶瓷電容器	220nF/50V	只	1	
18	C7	陶瓷電容器	4.7nF/50V	只	1	
19	C9	電解電容器	100μF/50V	只	1	
20	C10	方形電容器	0.22μF/250V	只	1	
21	電感鐵芯		CS400125	只	1	
22		漆包線	2UEW-B、0.5mm	公尺	10	
23	Q1	電晶體	NMOS 20N60CFD 650V/20.7A	只	1	
24	D1	蕭特基二極體	IDT08S60C	只	1	
25	D2	快速二極體	UH5JT	只	1	
26	D3	二極體	1N4007	只	1	
27	D4	發光二極體	LED、ϕ 3mm、RED	只	1	
28	U1	控制 IC	ICE2PCS02	只	1	※ 鍚接於 下層板
29	L、N、GND、 V <sub>cc</sub> 、GND1、 V <sub>o</sub> 、V <sub>g</sub> 、V <sub>d</sub> 、V <sub>s</sub> 、 V <sub>s</sub> *、V <sub>a</sub> 、V <sub>k</sub>	測試端子	ϕ 0.8mm x 10mm	只	12	
30		六角銅柱	ϕ 5.6mm x 15mm	只	4	
31		六角螺帽	M3 x 0.5	只	4	固定銅柱 用
32	PCB	印刷電路板	100mm x 200mm	片	1	
33	DB	橋式整流二極體	GBU406	只	1	
34	F1	保險絲	保險絲底座 20mm， 保險絲：250V/6A	只	1	
35	J1、J2	電流測試端子	2pins、2.54mm、排 針	只	2	

項次	代碼	名稱	規格	單位	數量	備註
36		連接線	1p、2.54mm、雙頭杜邦連接器、長度為20cm、導體截面積1mm <sup>2</sup> 以上	條	2	
37		短路夾	2pins、2.54mm	只	2	
38		鉗錫		公尺	1	

(※J1、J2 為量測電流之跳線，需要留足夠寬度讓測試棒勾著)

本試題電路方塊圖如圖 4-2 所示，包含(1)輸入電路(交流電)、(2)全波整流電路、(3)功因修正電路(升壓式)、和(4)負載(功率電阻)等四部份，以下將分述各電路之動作原理。

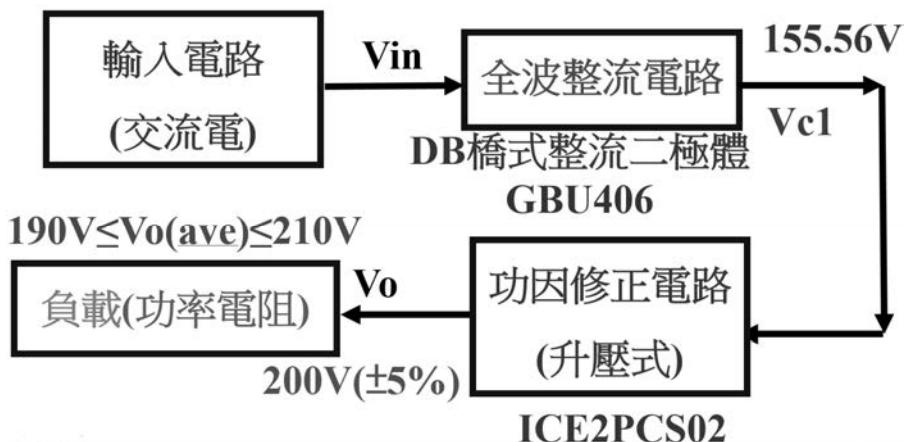


圖 4-2 功率因數修正器：電路方塊圖

### 4-3-1 輸入電路

輸入電路由交流電源  $V_s$ 、保險絲 F1、湧浪電流保護器 RT1 和電容器 C1 組成，電路如圖 4-3 所示。 $V_s$  由自耦變壓器輸出提供交流電源 110V(rms)，利用保險絲 F1 提供穩態之過電流保護；系統初始供電狀態時，由於電壓快速上升，會產生很高的湧浪電流，利用湧浪電流保護器保護設備，以防其因瞬間湧浪電流過大造成損害；電容器 C1 則提供穩壓效果。

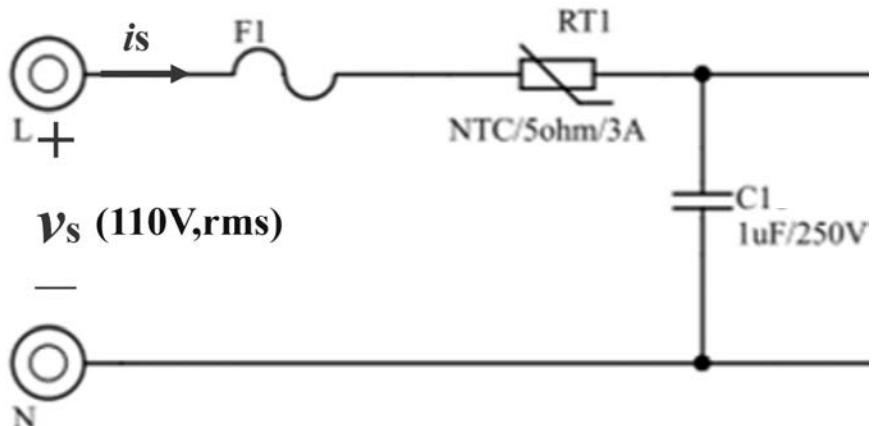


圖 4-3 輸入電路

### 4-3-2 全波整流電路

全波整流電路由橋式整流二極 DB、電容器 C10、二極體 D3、電阻器 R14 和發光二極體 D4 組成，電路如圖 4-4 所示。整流電路目標為產生平均值固定之直流電壓，本試題係利用橋式整流二極 DB 將交流電源 110V(rms)整流為脈動直流電壓，此直流電壓透過二極體 D3 使發光二極體 D4 亮，電阻器 R14 為 D4 之限流電阻，最後由電容器 C10 提供穩壓濾波功能，將直流電壓平均值計算如下：

$$V_C = 110\sqrt{2} = 155.56V$$

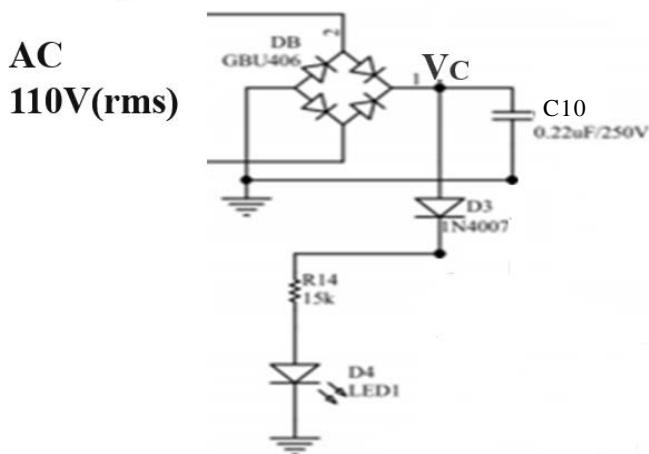


圖 4-4 全波整流電路

### 4-3-3 升壓轉換器

升壓轉換器(boost converter)之主電路由直流電源  $V_C$ 、電流測試端子 J1、J2、電感器 L1、開關 Q1、二極體 D1、電容器 C2 和電阻器 R3、R4、R10、R11、R12 組成，電路如圖 4-5 所示。升壓轉換器係將 155.56V 之輸入直流電壓提升至  $200 \pm 5\%$  V，即輸出端  $V_o$  之平均值為 190~210V，控制電路由 U1 ICE2PCS02 和週邊元件所組成。

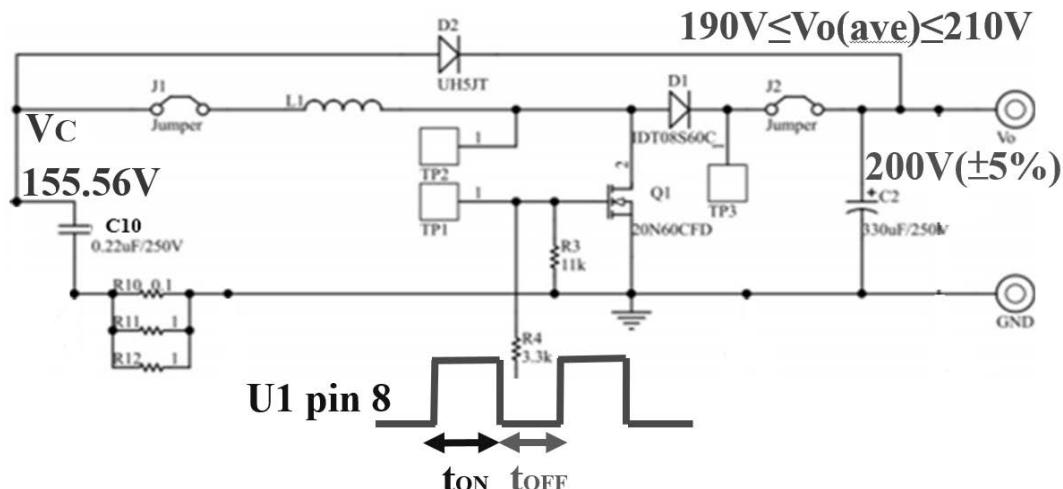


圖 4-5 升壓轉換器

開關 Q1 為 n 通道增強型金屬氧化物場效電晶體(n channel enhancement type metal oxide field effect transistor)，為壓控元件，由  $V_{GS}$  控制 MOSFET 導通狀態，圖 4-5 中 U1 第 8 腳提供可調整責任週期(duty cycle)D 之方波即為  $V_{GS}$ 。

1.  $V_{GS} \geq V_{th}$ (臨界電壓, threshold voltage) :  $V_{GS}$  為正電壓時，吸引足夠數量之電子，建立通道，Q1 導通，電流可從汲極-源極間之通道流過， $i_{DS}>0$ 。當通道建立，本試題之本試題之  $V_C$  經 J1、L1、Q1、R10//R11//R12 形成電流迴路，Q1 通道電阻和 R10//R11//R12 等效電阻都很小，若忽略之則誤差不大，此時輸入電壓  $V_C$  提供之能量幾乎全部儲存於電感器 L1 兩端，此時電感為儲能狀態，電感電流上升。若 Q1 導通時間越長，即責任週期 D 越大，則儲存於 L1 之能量  $W_L$  越多。
2.  $V_{GS} < V_{th}$ (臨界電壓, threshold voltage) : 電壓無法吸引電子建立通道時，汲極-源極間之通道形同開路，Q1 截止， $i_{DS}$  為 0。L1 電流瞬間不會改變，此電流驅使 D1 導通， $V_C$  經 D1、J2、C2 形成電流迴路，L1 和  $V_C$  之能量(即  $W_L$  和  $W_C$ )皆釋放出來轉而儲存於電容器 C2 兩端，兩者之能量造成輸出端電壓  $V_o$  高於輸入端電壓  $V_C$ ，故為升壓轉換器，此時電感為釋能狀態，電感電流下降。

$$V_o = \frac{1}{1-D} V_c \Rightarrow D = 1 - \frac{V_c}{V_o}$$

$$D = 1 - \frac{V_c}{V_o} = 1 - \frac{155.56}{200} = 0.22$$

$$W_L = \frac{1}{2} L I^2$$

$$W_C = \frac{1}{2} C V^2$$

#### 4-3-4 升壓式功率因數修正器(boost power factor corrector)

升壓式功率因數修正器之電路如圖 4-6 所示，由輸入電源  $V_c$ 、二極體 D3、控制積體電路 U1、單芯線 W1、電阻器 R1~R13 和電容器 C10、C4~C9 組成，責任週期由控制 IC U1 第 8 腳輸出，主要功能係將輸入電源  $V_c$  由直流電壓 155.56V 提升至 200V 輸出，並將輸入電流  $i_s$  修正為接近正弦波形且與輸入電源  $V_s$  同相位，以達成功率因數修正之目的。

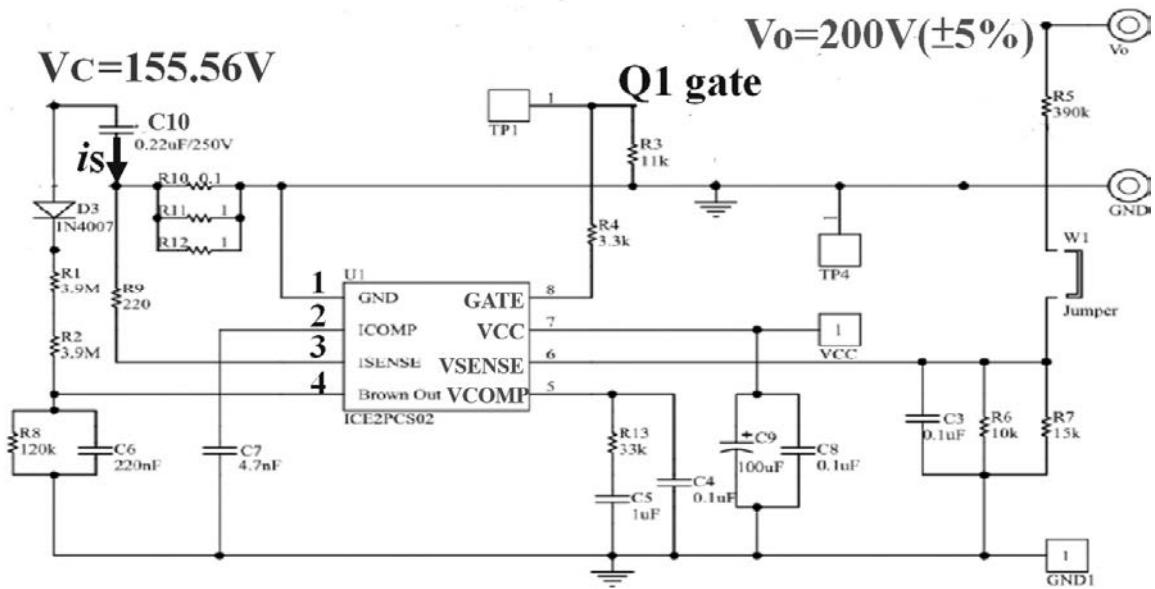


圖 4-6 升壓式功率因數修正器電路

U1 控制 IC ICE2PCS02 為升壓式功率因數修正電路之核心元件，接腳配置如圖 4-7，8 支接腳說明如表 4-2，代表方塊圖(representative block diagram)如圖 4-8 所示，其典型應用如圖 4-9 所示，為獨立之功率因數修正電路控制器，持續導通模式

(Continuous Conduction Mode，簡稱 CCM)，具有輸入端電力減弱保護(input brown-out protection)，將分別說明如下。

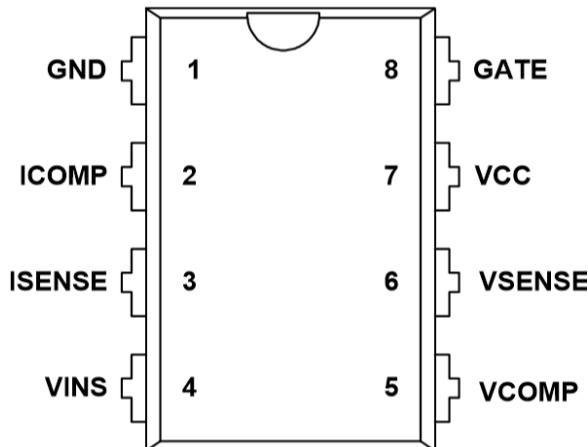


圖 4-7 控制 IC ICE2PCS02 之接腳配置

表 4-2 控制 IC ICE2PCS02 之接腳說明

Pin	Symbol	Function
1	GND	IC Ground
2	ICOMP	Current Loop Compensation
3	ISENSE	Current Sense Input
4	VINS	Brown-out Sense Input
5	VCOMP	Voltage Loop Compensation
6	VSENSE	V <sub>OUT</sub> Sense (Feedback) Input
7	VCC	IC Supply Voltage
8	GATE	Gate Drive Output

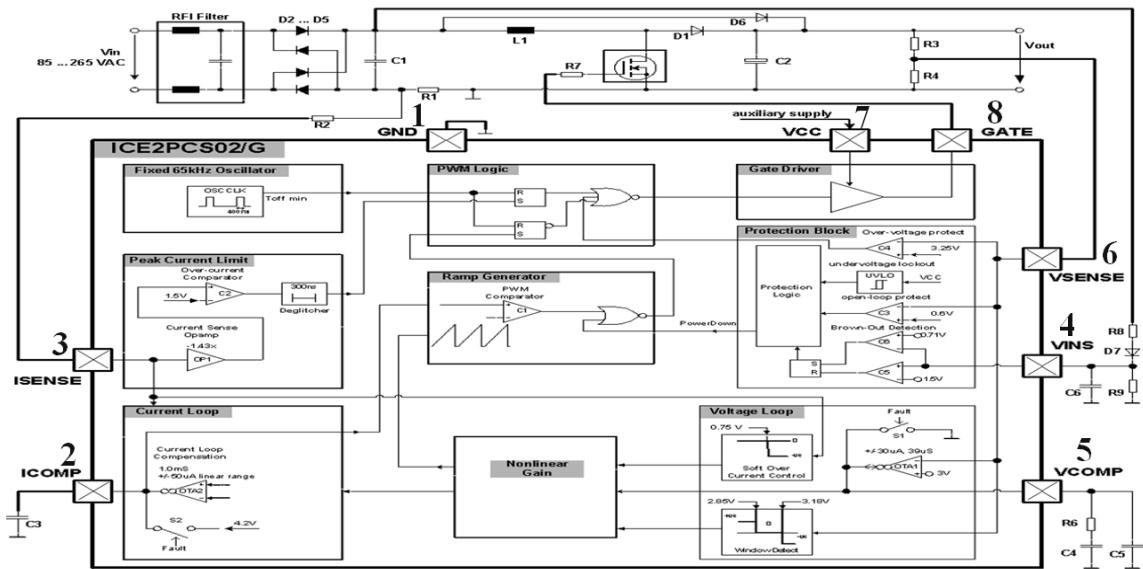


圖 4-8 控制 IC ICE2PCS02 之代表方塊圖

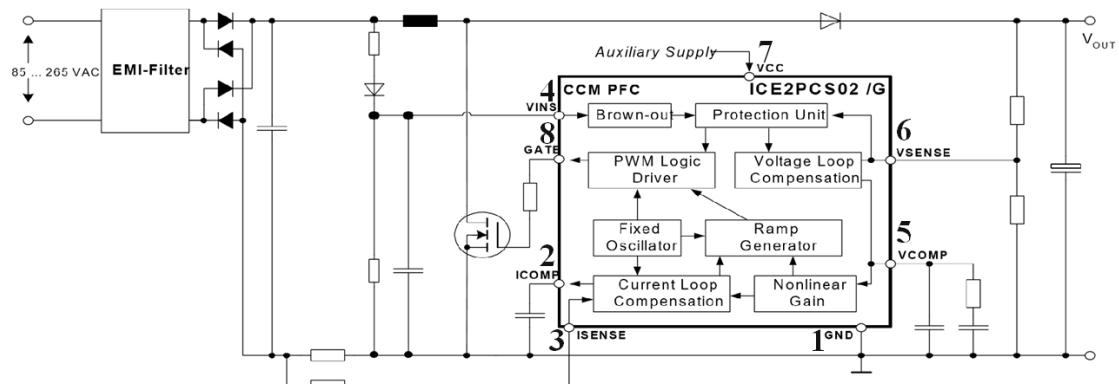


圖 4-9 控制 IC ICE2PCS02 之典型應用

## 1. 第 1 腳 GND

GND 為 IC 接地端。

## 2. 第 2 腳 ICOMP

電流迴路補償端，連接電容 C7。

## 3. 第 3 腳 ISENSE

電流回授輸入端，透過外加感測電阻產生的電壓回授至此腳，可在不同負載下調整電流訊號輸出。利用 R10//R11//R12 小電阻和 MOSFET Q1 串聯以取得  $i_{DS}$ ，轉換成電壓，經電阻 R9 回授至腳 3，為電流迴路中調整平均電流之輸入訊號。

#### 4. 第 4 腳 VINS

VINS 即電力減弱感測輸入(Brown-out Sense Input)端，當 VINS<0.71V，關閉 IC，無法執行正常功能，當 VINS>1.5V，啟動 IC，維持正常運作。電力減弱保護(Brown-out protection)電路由全波整流電路輸出直流電壓  $V_C$ 、二極體 D3、電阻 R1、R2、R8 和電容 C6 所組成， $V_C$  經電阻 R1、R2、R8 分壓，利用電容 C6 穩壓濾波後送至 U1 第 4 腳，關係如下式，藉以執行 U1 之正常功能。

$$\begin{aligned} V_{Pin\ 4} &= \frac{R_8}{R_1 + R_2 + R_8} (V_{C1} - V_{D3}) \\ &= \frac{120\ K}{3.9\ M + 3.9\ M + 120\ K} \times (155.56 - V_{D3}) \end{aligned}$$

#### 5. 第 5 腳 VCOMP

電壓迴路補償端，此腳連接電阻 R13 和電容 C4、C5 提供輸出電壓補償。

#### 6. 第 6 腳 VSENSE

電壓感測/回授輸入端，回授電壓(Feedback Voltage)之參考數值為 3V，輸出電壓回授電路由輸出直流電壓  $V_o$ 、單芯線 W 1、電阻 R5、R6、R7 和電容 C3 所組成， $V_o$  經電阻 R5、R6、R7 分壓得到  $V_{FB}$ ，利用電容 C3 穩壓濾波後送至 U1 第 6 腳(即控制 IC ICE2PCS02 之電壓回授端)，關係如下式。

$$\begin{aligned} V_{FB} &= \frac{R_6 // R_7}{R_5 + (R_6 // R_7)} V_o \\ &= \frac{10K // 15K}{390K + (10K // 15K)} \times 200V = 3.03V \end{aligned}$$

#### 7. 第 7 腳 VCC

控制 IC U1 電源供應端，須連接至外部輔助電源，操作範圍為 11V~26V，本試題使用電源供應器提供直流電壓 18V，電流限制設定為 3A，使 U1 得以正常運作。

#### 8. 第 8 腳 GATE

閘極驅動輸出(Gate Drive Output)端，透過電阻器 R3 將內部驅動級之 PWM 訊號輸出送至開關 Q1 閘極，閘極驅動電壓由 U1 內部箇位固定在 15V，藉以控制其導通狀態。

### 4-3-5 負載

本試題負載為功率電阻器，規格為  $1600\Omega/150W$  和  $800\Omega/150W$ ，外觀如圖 4-10 所示， $1600\Omega/150W$  功率電阻器具備並聯開關，本試題共有  $1/4$  載、半載和滿載 3 種狀態，如表 4-3 所示，連接於輸出  $V_o$ ，建議使用三用電表歐姆檔(RX1 檔)量測電阻值確認之。



圖 4-10 功率電阻器之外觀圖

表 4-3 負載狀態

負載	並聯開關	連接方式	$R_L$ 數值
1/4 載	off	一個 $1600\Omega/150W$ 電阻	$1600\Omega/150W$
半載	on	兩個 $1600\Omega/150W$ 電阻	$800\Omega/150W$
滿載	on	兩個 $1600\Omega/150W$ 電阻並聯，再並聯 $800\Omega/150W$ 電阻	$400\Omega/150W$

### 4-4 實體製作

實體製作包含電感器繞製、電感器參數量測、電路板製作與測試、電路功率轉換效率量測、電路的電壓及電流波形量測與繪製和評分等工作項目，在應檢時間的 6 小時內，各項工作之建議時程如表 4-4 所示。

表 4-4 功率因數修正器應檢工作時程

項次	工作項目	時間
1	電感器繞製	40 分鐘
2	電感器參數量測	10 分鐘
3	電感器參數評分	10 分鐘
4	電路板製作與測試	50 分鐘
5	電路功率轉換效率量測	30 分鐘
6	電路功率轉換效率評分	20 分鐘
7	電壓及電流波形量測與繪製	30 分鐘
8	電壓及電流波形評分	30 分鐘
9	檢修	140 分鐘
合計：360 分鐘		

#### 4-4-1 電感器繞製

實體製作的第一步為繞製電感器，需要環型鐵芯和漆包線，材料如圖 4-11 所示，考生須依表 4-5 中之電感器繞製說明進行繞製。

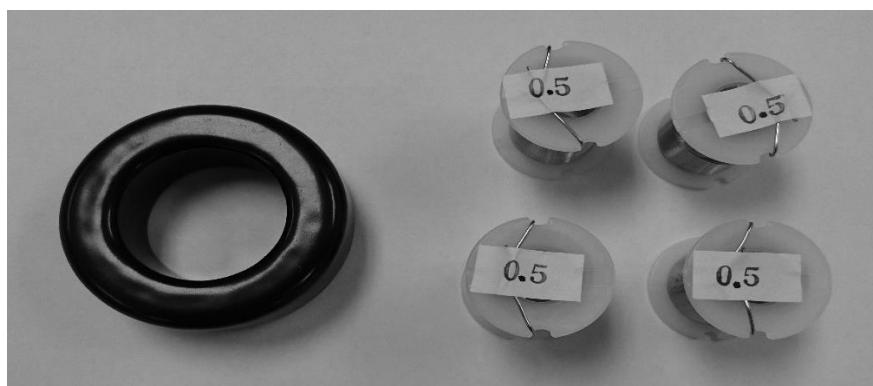


圖 4-11 繞製電感器之材料

表 4-5 電感器繞製說明

線徑(ψ)	圈數(T)	電感值	備註
$\phi 0.5\text{mm} \times 2\text{P}$	93	1.5mH(參考值)	以單芯漆包線並聯成 2P

電感器繞製重點如下：

1. 漆包線先拉開再進行繞製。
2. 繞線方向要一致(同方向繞)。
3. 漆包線要拉直靠緊鐵芯。
4. 線圈數量要正確。
5. 環形鐵芯很脆弱，繞製時易摔壞。

建議使用助繞器繞製電感器，步驟如下：

1. 將兩捲 0.5mm(各 5 公尺)漆包線拉開。
2. 需要雙線(2P)繞製，將兩條 0.5mm 之漆包線盡量平行纏繞在助繞器上。
3. 以助繞器帶動漆包線穿過環型鐵芯，開始繞製電感，約 93 圈，線圈兩側皆須預留長度。
4. 電感值以 R-L-C 測試器量測後，在線圈兩側上錫。

繞製過程如圖 4-12 所示，繞製完畢後成品如圖 4-13 所示。



圖 4-12 電感器繞製過程

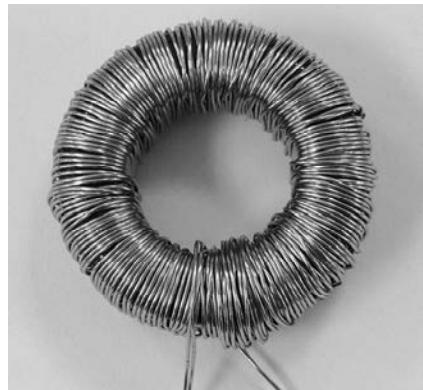


圖 4-13 電感器成品

#### 4-4-2 電感器參數量測

將繞製好的電感器，以 R-L-C 測試器進行參數量測，並填入表 4-6 中，參數量測完成須舉手請監評人員會同抽驗量測項目，並由監評人員評分及簽名之後，才能將電感器鉗接到電路板上。電感器參數量測之步驟如下：

1. 將 R-L-C 測試器測棒分別接至電感器第 1、2 腳，選擇待測元件為電感(L)。
2. 選擇測試頻率為 100kHz。

3. 選擇測試電壓為 1V(rms)。
4. 選擇量測品質因數(Q)。
5. 讀取電感值(需轉換成 mH)和品質因數 Q。
6. 選擇量測線圈直流電阻(即 DCR)並讀取數值(需轉換成 mΩ)。

電感器之線圈電感和品質因數參數量測如圖 4-14，線圈直流電阻量測圖 4-15 所示，和電感器參數量測相關之評分表如表 4-7，量測結果如表 4-8。其中品質因數之定義如下：

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{\omega L}{R} = \frac{2\pi f L}{R}$$

$Q$  為無單位之參數， $0 \leq Q \leq \infty$ ，數值越大代表電感器之品質越好，其中  $L$  為電感值， $f$  為測試頻率， $R$  為等效串聯電阻 ESR。線圈電感參考值為 1.5mH，線圈直流電阻數值越小越好，須以  $m\Omega$  之單位填入表中，換算時切勿犯錯。

表 4-6 電感器參數量測表

項次	內容	繞組	腳位	數值	單位	備註
1	線圈電感	N1			mH	@ 100kHz/1V
2	品質因數	N1				@ 100kHz
3	線圈直流電阻	N1			mΩ	

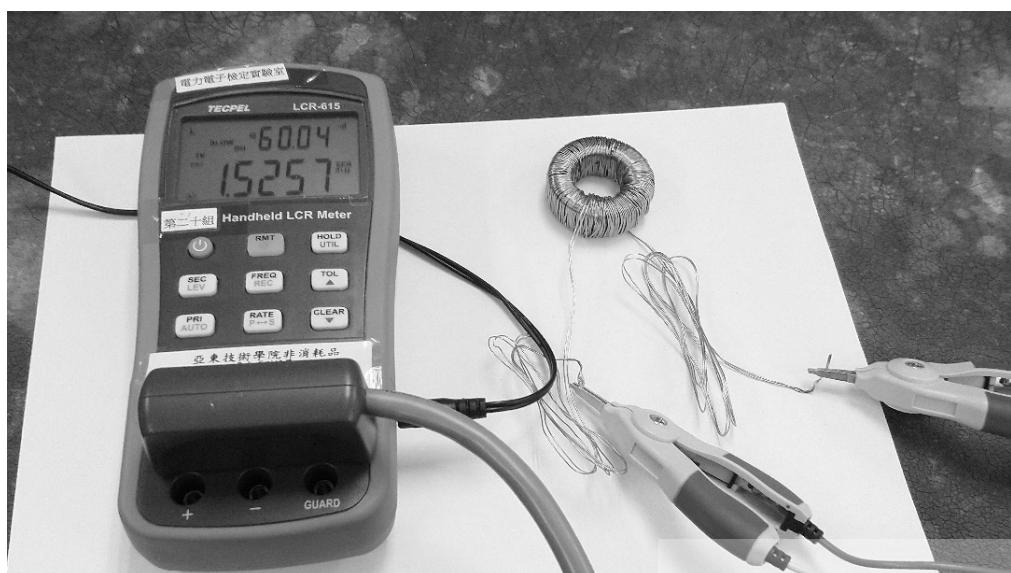


圖 4-14 電感器 L1 參數量測：線圈電感和品質因數

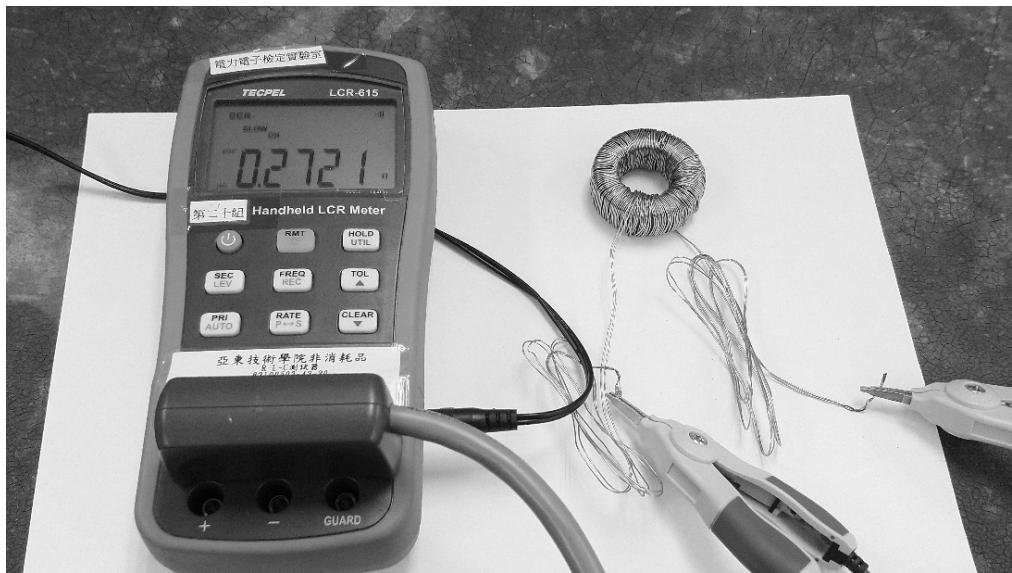


圖 4-15 電感器 L1 參數量測：線圈直流電阻

表 4-7 評分表-電感器參數量測

項目	評分標準	扣分標準			備註
		每處扣分	最高扣分	每項最高扣分	
三、量測	1. 電感器參數量測表欄位空白未填或填寫不實	5	20	50	

表 4-8 電感器參數量測結果

項次	內容	繞組	腳位	數值	單位	備註
1	線圈電感	N1	1-2	1.5257	mH	@ 100kHz / 1V
2	品質因數	N1	1-2	60.04		@ 100 kHz
3	線圈直流電阻	N1	1-2	272.1	mΩ	