

# 福衛五號衛星電源控制與分配單元之保護電路設計

## Power Control Distribution Unit Protection Circuit Design of FORMOSAT-5 Satellite

黃哲政、葉嘉靖

Che-Cheng Huang, Jia-Jing Yeh

福衛五號衛星的電源控制與分配單元主要功能為衛星電力系統的控制與分配中心，如同人體之心臟及血液系統，將太陽能板所產生的電能提供成衛星操作所需電力，分配適當電力給使用者。電源控制與分配單元的保護電路主要著眼於電壓與電流兩部分：電壓保護部分主要為主電源通道的電壓過低鎖定偵測電路、衛星電池的過電壓偵測電路、以及 DC-DC 轉換器的過低電壓偵測電路；電流保護方面分別為電源使用者與內部直流轉換電路的過電流保護電路。當異常發生時，保護裝置可即時提供電力使用者與內部電路系統隔離與保護。本文將針對這些保護電路的原理與設計電路作詳細的說明與分析。

The power control and distribution unit (PCDU) in FORMOSAT-5 satellite, acts as the satellite power and allocation center, similar to human heart. The main functions are to condition energy from the solar arrays and distribute power for all subsystems on the satellite. The PCDU's protection circuits provide monitoring and isolation according to voltage and current of internal circuit system and external power users. The voltage protection circuits are undervoltage-lockout (UVLO) detector for the main bus, over voltage (OV) detector for satellite battery, and under voltage (UV) protector for DC-DC converters. The portion of current protection circuit is over current (OC) protector for external power users and DC-DC converter system. This paper describes protection working methods and the reliable circuit design implementation.

### 一、前言

福爾摩沙衛星五號為我國第一顆自主發展的遙測衛星，由國家太空中心整合國內外產學研團隊共同研發，其任務軌道為高度 720 公里、再訪週期 2 天的太空同步軌道<sup>(1)</sup>，福衛五號將攜帶對地解析度 2 米 (全色態) 及 4 米 (多光譜) 光學酬載，執行對

地觀測任務。福衛五號計畫除將繼續提供全球影像服務任務外，並期許能藉由本計畫的執行，建置我國光學遙測酬載與衛星本體延續的能量。

福衛五號的衛星電力系統之系統架構如圖 1 所示，由太陽能板 (solar arrays, SA)<sup>(2)</sup>、電源控制與分配單元 (power control distribution unit, PCDU)、

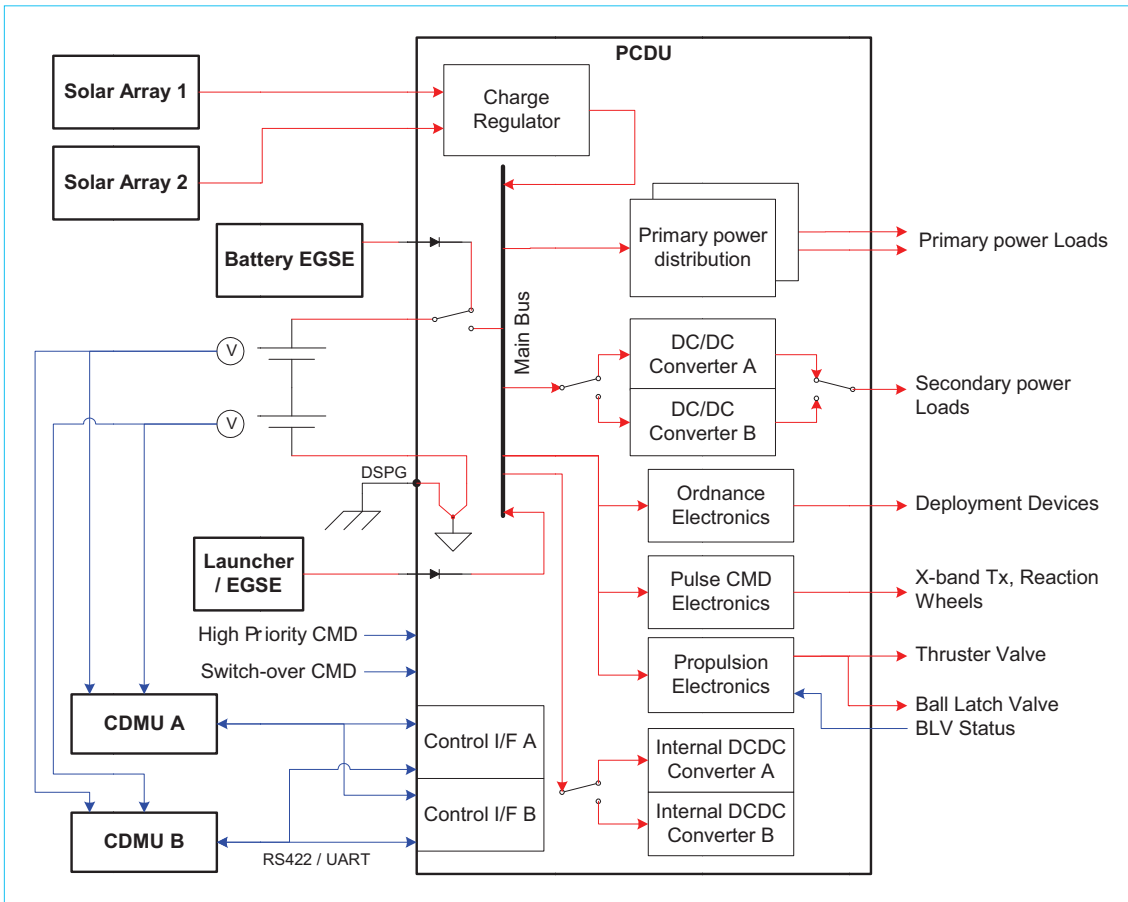


圖 1. 福衛五號衛星電力系統架構圖。

與衛星電池所組成。PCDU 主要功能為衛星電力系統的控制與分配中心，如同人體之心臟及血液系統，將太陽能板所產生的電能提供成衛星操作所需電力，分配適當電力給使用者。控制部分主要是管理衛星電池的充放電，偵測使用者發生異常過電流與低電壓的保護，並固定將 PCDU 的狀態回報給衛星電腦 (command and data management unit, CDMU)，對電能做控制、調節和安全回報。

## 二、電源控制與分配單元

福衛五號計畫中 PCDU 為國內自製衛星關鍵元件，具備超過 150 個電力輸出通道，由太空中心與國內研究單位合作發展。福衛五號 PCDU 如圖 2 所示，包括有以下七個模組系統。

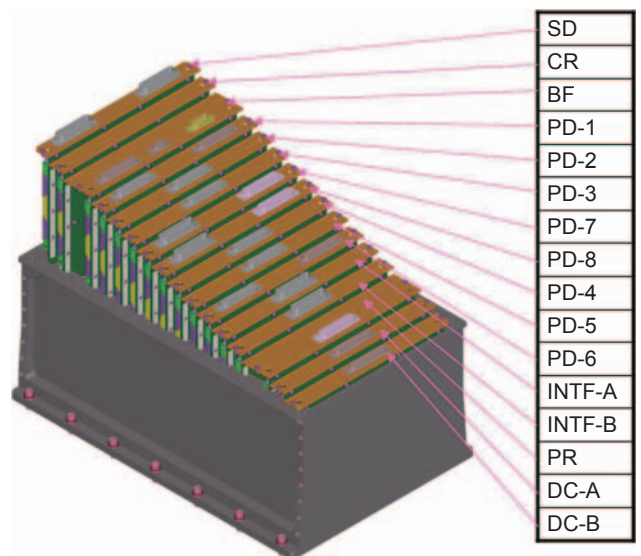


圖 2. PCDU 模組配置圖。

## 1. 太陽能二極體電路系統 (Solar Array Diode, SD)

福衛五號的太陽能板共有兩片，每片各由 19 條太陽能串列 (string) 組成，每條太陽能串列由 20 個感光單元件 (cell) 所連成。SD 系統主要是將每一條太陽能串列所產生的 DC 電流作整流 (ratification)，並將其合流至主電源通道 (main bus) 上。SD 系統內每條太陽能串路徑上均串聯兩個蕭基二極體 (Schottky diode)<sup>(3)</sup>，提供每條太陽能串列整流功能，並防護主電源通道的電流回灌至每個太陽能串列。SD 系統同時提供兩組電流量測電路，量測主電源通道上的太陽能 DC 電流，並透過介面控制電路系統 (housekeeping and interfacing) 將訊號傳至衛星電腦作監控。

## 2. Bus 濾波電路系統

Bus 濾波電路系統 (bus filter, BF) 的設計功能是為了減少主電源通道上的雜訊，主要構成元件為聚碳酸酯薄膜 (polycarbonate film) 電容與陶瓷電容。系統內放置一繼電器，作為衛星電池由主電源通道充電或放電的控制切換，並設計三個電流量測電路，監控衛星電池的充電／放電的電流偵測。

## 3. 充電調節電路系統

充電調節電路系統 (charge regulator, CR) 的功能為控制主電源通道電壓與電池的充電電流。系統內共有 36 組分流接地 (shunting ground) 電路，負責控制太陽能板上的太陽能串列分流接地與否。並同時設計兩組監控衛星電池電壓的過電壓 (over voltage) 偵測電路，當電壓高於所設定的警戒值時，CR 系統會依據指令將太陽能串列分流接地，調整主電源通道電壓與電池的充電電流大小，保護 PCDU 系統。

一般操作控制主要由介面控制電路系統與 CR 電路系統內部的元件可程式邏輯閘陣列控制晶片 (field programmable gate array, FPGA)<sup>(4)</sup> 負責，決定太陽能串列需被分流接地的數量。

## 4. 介面控制電路系統

衛星電腦對 PCDU 的操作控制與資料傳

輸主要是透過 PCDU 裡的介面控制電路系統 (housekeeping and interfacing, INTF)，傳輸介面使用 RS-422<sup>(5)</sup> UART I/F。衛星電腦可透過 INTF 電路系統控制 PCDU 輸出給各個子系統的電源開關，並定時獲取 PCDU 各電路上的電壓與電流狀況，提供給地面的操作人員作及時的監控。

## 5. 直流轉換電路系統

直流轉換電路系統 (DC conversion, DC) 是將主電源通道電壓轉換成 PCDU 所使用的內部電源與分配給外部系統的外部電源電壓。電路分成兩個系統：內部直流電源轉換器 (internal DC-DC converter section) 與外部直流電源轉換器 (external DC-DC converter section)。內部直流電源轉換器的輸出主要是供應 PCDU 內部各個系統子電源，外部直流電源轉換器主要是轉換成二次電力分配電路 (secondary power distribution) 的供應電源。

內部直流電源轉換器與外部直流電源轉換器的系統輸入端均各設計一個過電流 (over current) 保護電路，當電流大於所設定的限定值時，防護措施立即將電流壓制在限定值，並在 10 ms 後關閉電源輸入，保護內部電源轉換器與外部電源轉換器系統。

為了滿足 PCDU 在可靠度上的需求，DC 電路系統同時設計了相同規格的第二套系統，作為冷複聯系統 (cold redundancy) 使用。此系統在未啟動時，並無消耗任何功耗。

## 6. 複聯控制電路系統 (Power Relay, PR)

複聯控制電路系統功能主要是控制 DC 電路系統裡內部電源轉換器及外部電源轉換器，由常態系統 (normal set) 切換至複聯系統 (redundant set)，切換的方式是使用磁保持繼電器 (latching relay) 做為開關。

在複聯控制電路系統裡，每個 DC-DC 轉換器的輸出均設置過低電壓 (under voltage) 偵測電路，若有一 DC-DC 轉換器電壓低於規定的最低電壓時，偵測器立即發出旗標訊號至 PR 電路系統內的 FPGA，並將訊息經由 INTF 電路系統傳輸至衛星電腦。此時 FPGA 也會立即驅動繼電器電路，將原本於常態系統的內 (或外) 部電源轉換器切換複聯

系統，隔離有問題的系統，並及時的供電給 PCDU 內部 (或外部系統) 的電源使用。

DC 電路系統裡過電流保護電路的控制也是由 PR 電路系統內的 FPGA 所控制，當電流超過限定值時，同樣的常態系統的內 (外) 部電源轉換器也會切換至複聯系統，達到 DC-DC 轉換器的保護。

PR 電路系統同時設有電壓過低鎖定 (undervoltage-lockout)<sup>(6)</sup> 電路來監控主電源通道電壓，當電壓低於設定值時，主電源通道電源將停止供應給 PCDU，衛星因而失去 PCDU 的電源供應，所有的系統處於斷電的狀態。待主電源通道電壓回復至可接受的準位後，PCDU 又重新開始工作，衛星恢復功能。

二次電力分配電路因空間的關係，分配至備源控制電路系統板內。主要功能是提供衛星上使用外部電源轉換器輸出電壓作為電源的次系統，並透過 PR 電路系統上的 FPGA 控制每個供電開關 (switch) 電路，決定電流的輸出與否。

## 7. 電力分配電路系統

電力分配電路系統 (power distribution, PD) 主要是提供衛星上各個次系統與酬載所需的主電源通道電壓與額定電流，並透過 FPGA 來控制每個供電開關電路。在可靠度上的需求，PD 電路系統同時也設計了相同規格的第二套系統，作為冷複聯系統使用。

在 PD 電路系統上的各次系統供電路徑均設置過電流保護裝置，當操作電流超過所設定的警戒電流 (trip-off current) 即可透過 FPGA 關閉開關電路，停止供電給電流異常的次系統。如同直流轉換電路系統的設計，當電路發生短路而產生湧入電流 (inrush current) 時，PD 電路系統同樣提供防護措

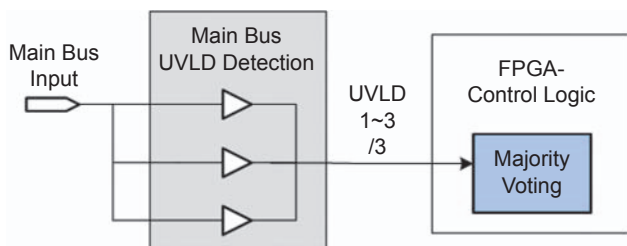


圖 3. Main Bus 的 UVLO 電路。

施將電流壓制在限定值，並在一定時間內後關閉電源輸入，保護各個子系統。

不論是發生湧入電流或過額定電流的異常情形，PD 電路系統均同時會發出旗標訊號給介面控制電路系統並回報至衛星電腦。地面的分析人員在接收到此警示訊號後，經由錯誤的解決與狀況的排除後，透過衛星電腦下命令至介面控制電路系統，重新開啟 PD 電路系統上的電源開關或切換供電系統至複聯系統，達到衛星所需的功能操作。

## 三、保護電路設計原理

福衛五號 PCDU 的保護電路主要是監控各個電路系統與外部電源使用者的電壓值與電流值，當異常發生時可以即時提供保護與隔離。電壓的保護部分為位於 PR 電路系統內的電壓過低鎖定電路與過低電壓偵測電路，以及 CR 電路系統裡過電壓偵測電路。電流的保護方面則是位在 PD 電路系統與電路系統裡的過電流保護電路。本文將針對這些保護電路的原理與設計電路作詳細的說明與分析。

### 1. 電壓過低鎖定偵測電路 (Undervoltage-Lockout, UVLO)

監控衛星主電源通道的電壓過低鎖定電路架構如圖 3 所示，主要是利用三個比較器去偵測主電源通道電壓，當電壓低於所設定的標準時，比較器輸出端即可輸出一警示訊號至 PR 電路系統的 FPGA。經由 FPGA 內邏輯設定的多數決 (majority voting) 評估，判讀三個比較器的結果是否一致，若同時有兩個或以上的發出警示訊號，即判斷發生主電源通道電壓過低，此時 PR 的 FPGA 立即關閉 DC 電路系統的內/外部電源轉換器。

PCDU 在失去電力後，停止供應所有次系統的電源輸出，使衛星處於斷電的狀態，保護其安全。待太陽能 DC 電流對衛星電池充電，主電源通道電壓回復至所設定的準位後，PCDU 即可回到正常的操作模式 (normal mode)，衛星回復功能。

表 1 為電壓過低鎖定電路準位規格，低電壓點 ( $V_{UVLO-}$ ) 被設定為 22 V，回復電壓 ( $V_{UVLO+}$ ) 則設為 26 V。

表 1. 電壓過低鎖定電路準位規格。

UVLO signal	UVLO1		UVLO2		UVLO3	
	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
Main Bus Voltage	22 V ± 2.5%	26 V ± 2.5%	22 V ± 2.5%	26 V ± 2.5%	22 V ± 2.5%	26 V ± 2.5%

### (1) 反相雙穩態複振器

為了實現 UVLO 偵測電路，反相雙穩態複振器 (inverting bistable multivibrator)<sup>(7)</sup> 是一個很好的選擇。它的轉換特性如圖 4 所示，當輸入電壓大於負臨界電壓 (negative threshold voltage) 時，輸出電壓保持在低穩態 ( $-V_{sat}$ )，但當電壓略低於負臨界電壓點 ( $V_L$ ) 時，輸出立即轉換成高穩態 ( $+V_{sat}$ )；同樣的若輸入電壓小於正臨界電壓時，輸出電壓保持在高穩態，若當電壓略高於正臨界電壓點 ( $V_H$ ) 時，輸出立即轉換成低穩態。

此正負臨界電壓點可利用電阻作設計，實現出 UVLO 偵測電路所需要的低電壓點 22 V，及回復電壓 26 V，圖 5 為反相雙穩態複振器的電路圖。因為所欲使用的比較器輸出端內部為開集極 (open collector) 型式，因此外加一準位提升 (pull high) 電阻於輸出端，以利於電路的驅動輸出。

為推導此電路的轉換特性，首先假設比較器  $V_-$  輸入電壓大於  $V_+$  電壓，輸出端  $V_o$  即為 0 V ( $-V_{sat}$ )。此時電壓即可表示成

$$V_+ = V_{REF} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (1)$$

$$V_- = V_{in} \frac{R_5}{R_4 + R_5} \quad (2)$$

為了觸發此電路進入  $+V_{sat}$  的狀態， $V_{in}$  電壓必須降低以使得  $V_-$  等於  $V_+$ ，此臨界電壓即為  $V_L$ ，

$$V_L = V_{REF} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = V_{in} \frac{R_5}{R_4 + R_5} \quad (3)$$

此時的  $V_{in}$  即為  $V_{UVLO-}$ ，

$$V_{UVLO-} = \frac{V_{REF} R_2}{(R_1 + R_2)} \times \frac{R_4 + R_5}{R_5} \quad (4)$$

當  $R_5$  值為無限大時，

$$V_{in} = V_L = V_{REF} \frac{R_2}{(R_1 + R_2)} \quad (5)$$

第二步假設比較器  $V_-$  輸入電壓小於  $V_+$  電壓，此時輸出端  $V_o$  電壓即為  $V_{cc}$  ( $+V_{sat}$ )。  $V_+$  電壓即可表示成

$$V_+ = V_{cc} \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} + V_{REF} \frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (6)$$

$$V_- = V_{in} \frac{R_5}{R_4 + R_5} \quad (7)$$

同樣的為了觸發此電路進入  $-V_{sat}$  的狀態， $V_{in}$  電壓必須升高以使得  $V_-$  等於  $V_+$ ，此臨界電壓即為  $V_H$ ，

$$\begin{aligned} V_H &= V_{cc} \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} + V_{REF} \frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \\ &= V_{in} \frac{R_5}{R_4 + R_5} \end{aligned} \quad (8)$$

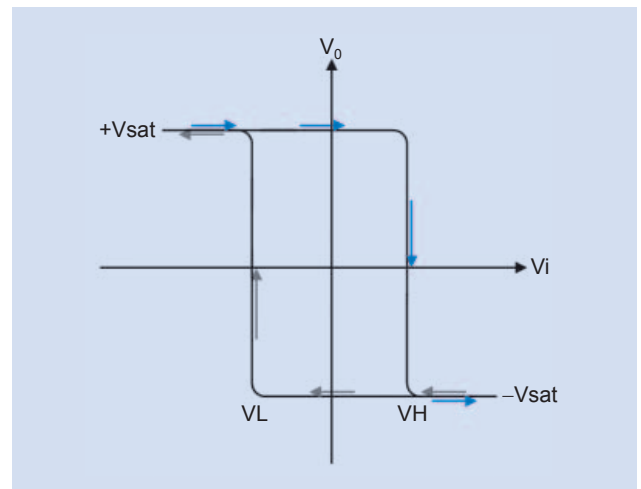


圖 4. 反相雙穩態複振器轉換特性。

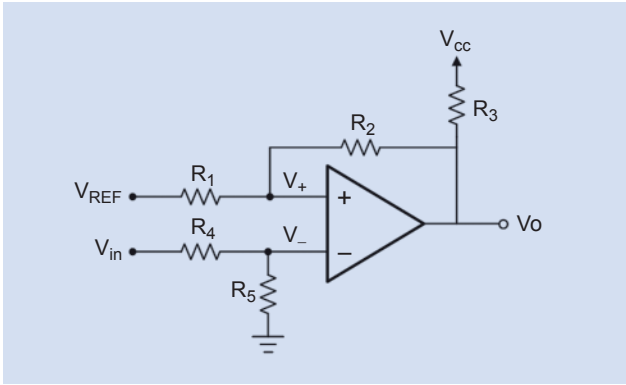


圖 5. 反相雙穩態複振器。

此時的  $V_{in}$  即為  $V_{UVLO+}$ ，

$$V_{UVLO+} = \left( \frac{V_{cc}R_1 + V_{REF}(R_2 + R_3)}{(R_1 + R_2 + R_3)} \right) \times \frac{R_4 + R_5}{R_5} \quad (9)$$

當  $R_5$  值為無限大時，

$$V_{in} = V_H = V_{cc} \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} + V_{REF} \frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (10)$$

## (2) UVLO 偵測電路

系統設定上在未發生 UVLO 保護機制時，需要將觸發電路 flag 輸出為 high 訊號，當 UVLO 發生時，flag 即轉態為低態 (low state)。反相複振器的輸出狀態恰與實際所需的邏輯觀念相反。為實現此邏輯設定，設計上需將反相複振器的輸出端同樣再接上一反相複振器，如圖 6 所示。此後極的反相複振器功用一方面作為狀態的反置用，另一方面是一般所使用的低功率低偏移電壓比較器 (low power

low offset voltage comparator)<sup>(8)</sup> 為雙 (dual) 包裝，直接設計成反相複振器即可達到轉態的需求，不需再多加一個反相元件 (inverter)，可節省成本。

## 2. 過低電壓偵測電路

過低電壓偵測電路 (under voltage, UV) 主要監控 DC 電路系統裡每個 DC-DC 轉換器<sup>(9)</sup> 的輸出電壓，若有一轉換器電壓低於規定時，偵測器立即發出旗標訊號至 PR 電路系統內的 FPGA，此時 FPGA 也會立即驅動繼電器電路，將原本於常態系統的內 (或外) 部電源轉換器切換複聯系統，隔離有問題的系統，並及時供電給 PCDU 內部 (或外部系統) 的電源使用。

內部直流電源轉換器的輸出電壓為  $\pm 15 V_{dc}$ 、 $+5 V_{dc}$ ，及  $+45 V_{dc}$ ，供應 PCDU 內部各個系統子電源，其中  $45 V_{dc}$  電壓是在主要電源通道為  $33.6 V$  的情況下，將  $12 V$  DC-DC 轉換器輸入電壓的正端連接至輸出端的負端點上而得出。外部直流電源轉換器主要是轉換成二次電力分配電路 (secondary power distribution) 的供應電源，輸出電壓為  $\pm 15 V_{dc}$  與  $+5.2 V_{dc}$ 。詳細規格如表 2 所示。

UV 偵測電路架構與 UVLO 偵測電路設計概念一樣，如同圖 5 的電路圖，均是使用反相雙穩態複振器作為主要的電壓比較器。依據每個 DC-DC 轉換器不同的輸出電壓，搭配不同的分壓電阻值，設計出每個專屬的 UV 偵測電路。同樣的為了符合輸出實際所需的邏輯觀念，反相複振器的輸出端同樣需再接上一反相複振器，在設計上，內 (外) 部電源轉換器只要有一 DC-DC 轉換器電壓異常即啟動發出旗標訊號，所以可以共用作為反向使用的反相

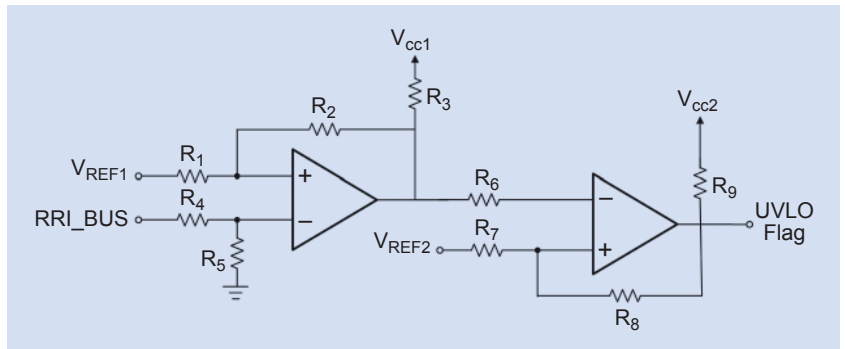


圖 6. UVLO 偵測電路。

表 2. DC-DC 轉換器輸出電壓規格。

Section	Test item	Specification
Internal DC Set	INT_+15V_A	+15V ± 0.75V
	INT_-15V_A	-15V ± 0.75V
	INT_+5V_A	+5V ± 0.25V
	INT_+45V_A (Main Bus = 33.6V)	+45 – +46.2V
External DC Set	EXT_+15V_A	+15V ± 0.75V
	EXT_-15V_A	-15V ± 0.75V
	EXT_+5V_A	+5.2V ± 0.26V

複振器，電路架構圖如圖 7 所示。

### 3. 過電壓偵測電路

太陽能板所產生出來的主要電源通道電壓一般希望能設定在 28 V，但事實上電壓值其實會隨著日照強度、角度以及用電量的多寡而有可能高於設定值。

CR 電路系統上設計了兩組不同臨界電壓 (threshold voltage) 的偵測電路，負責監控由主要電源通道充電的衛星電池。當 CR 系統接收到此兩組

偵測器的觸發訊號後，將分別控制太陽能板內的串列分流接地，調整主要電源通道電壓與電池充電電流的大小，避免過高的電壓傷害到 PCDU 系統。

第一組偵測電路的臨界電壓 OV\_level 1 設定為 33.8 V，當電壓高於此數值時，立即送出旗標 (flag) 信號給 CR 電路系統的 FPGA，FPGA 在兩秒後，同時控制兩塊太陽能板內的 9–18 太陽能串列分流接地。若主要電源通道電壓仍持續上升超過 34.0 V，第二組偵測電路立即輸出 OV\_level 2 的旗標至介面控制電路系統，將所有的太陽能串列分流接地。當主要電源通道的電壓低至 33.3 V 後，所有的太陽能串列恢復正常供給電流至主要電源通道。表 3 為過電壓保護電路 (over voltage, OV) 的準位規格。

OV 偵測電路與 UVLO 偵測電路相同如圖 6 所示，但是因有兩組不同準位的偵測電路，所以在設計上需搭配不同的電阻值以得到不同的觸發點。

### 4. 過電流保護電路

過電流保護電路 (over current protection, OC) 在 PD 電路系統與 DC 電路系統的電路架構與功能

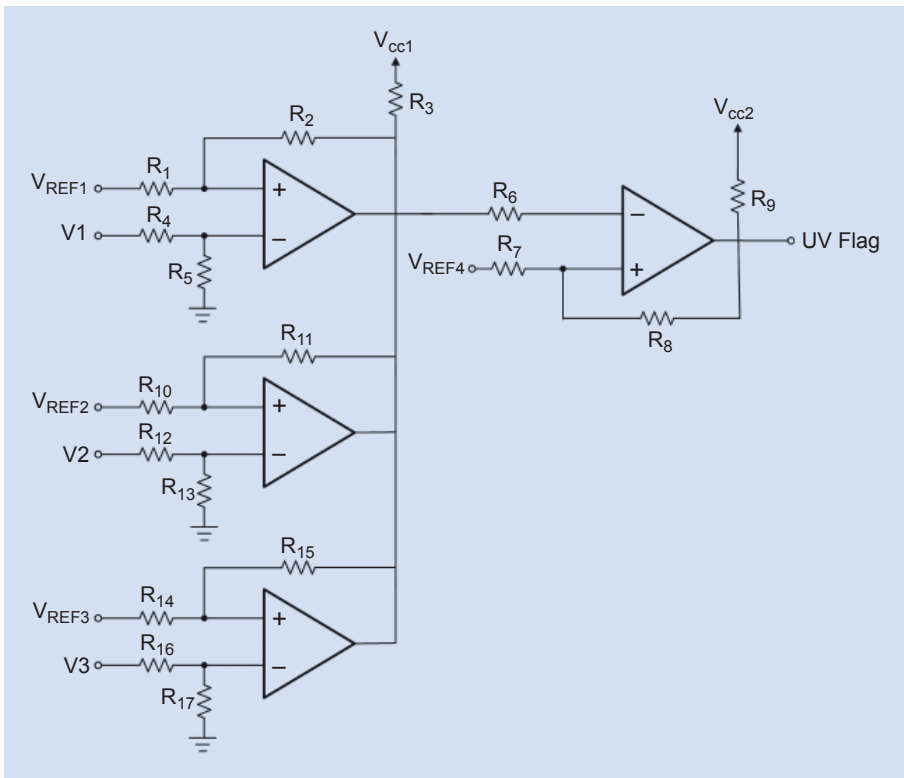


圖 7. UV 偵測電路架構圖。

表 3. 過電壓保護電路的準位規格。

Level	Shunt On		Protection Disable		Panel 1	Panel 2
	Level	Latency	Level	Latency		
1	33.8V	2 sec.	33.3 V	0 sec.	Strings 9-18	Strings 9-18
2	34.0 V	0 sec.	33.3V	0 sec.	Strings 1-18	Strings 1-18

均一致，主要的功能是作為過電流的保護裝置。電流發生異常時，OC 保護電路將發出一電流旗標給 FPGA，立即切斷電流供應使電源關閉輸出。當電路發生短路而產生湧入電流時，防護措施會將電流壓制在限定值，並在一定時間內後關閉電源輸入，保護各個子系統。過電流保護電路架構如圖 8 所示，依據功能可將電路分成四個部分：(1) 電流感測電路 (current sensing circuit)，(2) 過電流偵測電路 (over-current detection circuit)，(3) 電流監控電路 (current monitor) 及 (4) 限流保護電路 (latch current limit, LCL)。

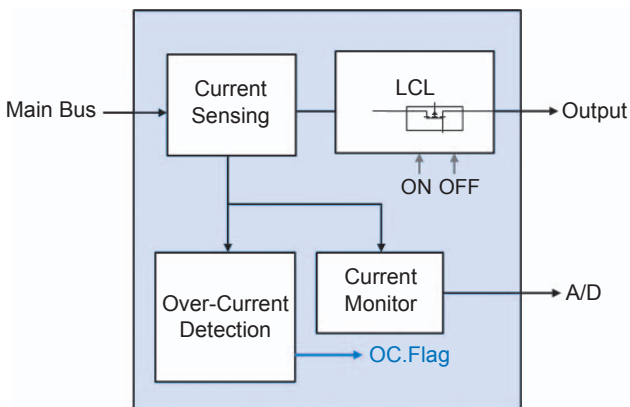


圖 8. 過電流保護電路架構圖<sup>(10)</sup>。

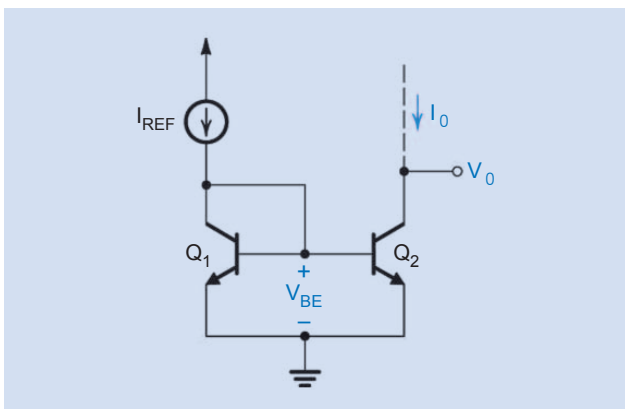


圖 9. BJT 電流鏡<sup>(11)</sup>。

### (1) 電流感測電路

電流感測電路 (current sensing circuit) 主要功能是将負載端所需的工作電流轉換成電壓形式，以作為電流值監控。不同的負載電流會轉換出不同的電壓值，利用這樣的結果於後端連接偵測特定電流的監控電路，以作為負載電路的保護。

電流感測電路架構是使用韋勒電流源 (Widlar current source) 與電壓隨耦器所組成的電流轉換電路系統。

欲分析韋勒電流源前，需先從 BJT 電流鏡 (current mirror)<sup>(12)</sup> 的架構瞭解。BJT 電流鏡主要是由兩個匹配的電晶體  $Q_1$  與  $Q_2$  所組成的，如圖 9 所示。由於它們的的基極和射極均接在一起，因此具有相同的  $V_{BE}$ 。除此之外， $Q_1$  的集極和基極間連成短路。電流鏡是以一定電流源  $I_{REF}$  來驅動的，而在  $Q_2$  的集極取其輸出電流。在此接在  $Q_2$  集極的電路必須使  $Q_2$  確定在主動區操作 (保持其集極電壓大於基極電壓)。輸入電流  $I_{REF}$  流經二極體型式的電晶體 (diode-connected transistor)  $Q_1$ ，建立一橫越  $Q_1$  的電壓，此電壓再出現於  $Q_2$  的基極與射極間。因為  $Q_2$  與  $Q_1$  完全一致，所以  $Q_2$  射極電流將和  $I_{REF}$  相等。考慮有限電晶體  $\beta$  值對電流鏡操作的影響，分析如下為使  $Q_1$  與  $Q_2$  匹配具有相同的  $V_{BE}$ ，故其集極電流相同，其分析見圖 10 所示。

$$I_0 = I_c \quad (11)$$

$$I_{REF} = I_c + 2 \frac{I_c}{\beta} = I_0 \left( 1 + \frac{2}{\beta} \right) \quad (12)$$

因此電流靜的電流增益 (current gain) 為

$$\frac{I_0}{I_{REF}} = \frac{\beta}{\beta + 2} = \frac{1}{\left( 1 + \frac{2}{\beta} \right)} \quad (13)$$

對於  $\beta \gg 1$  而言，此值趨近於 1。

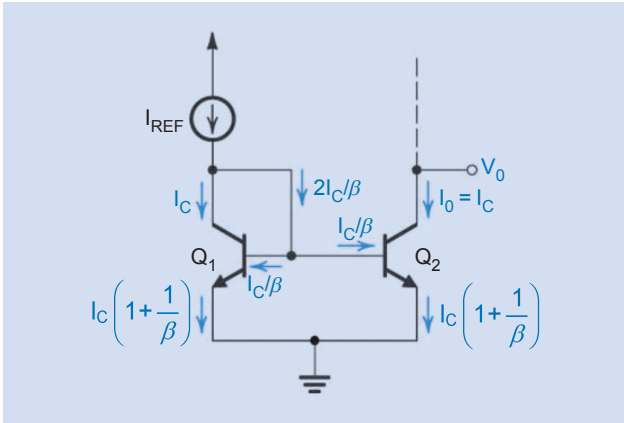


圖 10. BJT 電流鏡電流分析<sup>(10)</sup>。

韋勒電流源與 BJT 電流鏡電路不同之處如圖 11 所示，在於有一電阻  $R_E$  放於  $Q_2$  的射極接線上。忽略基極電流，則可得

$$I_{REF} = I_S e^{V_{BE1}/V_T} \quad (14)$$

$$I_0 = I_S e^{V_{BE2}/V_T} \quad (15)$$

將公式 (14)、公式 (15) 更改成

$$V_{BE1} = V_T \ln \left[ \frac{I_{REF}}{I_S} \right] \quad (16)$$

$$V_{BE2} = V_T \ln \left[ \frac{I_0}{I_S} \right] \quad (17)$$

這裡也需假設  $Q_1$  與  $Q_2$  為匹配。合併公式 (16) 與公式 (17) 二式，並由圖 11 可得

$$V_{BE1} - V_{BE2} = V_T \ln \left[ \frac{I_{REF}}{I_0} \right] = I_0 R_E \quad (18)$$

因此

$$I_0 R_E = V_T \ln \left[ \frac{I_{REF}}{I_0} \right] \quad (19)$$

使用韋勒電流源架構設計而成的電流感測電路，其電路圖如圖 12 所示。此電路主要功能是将

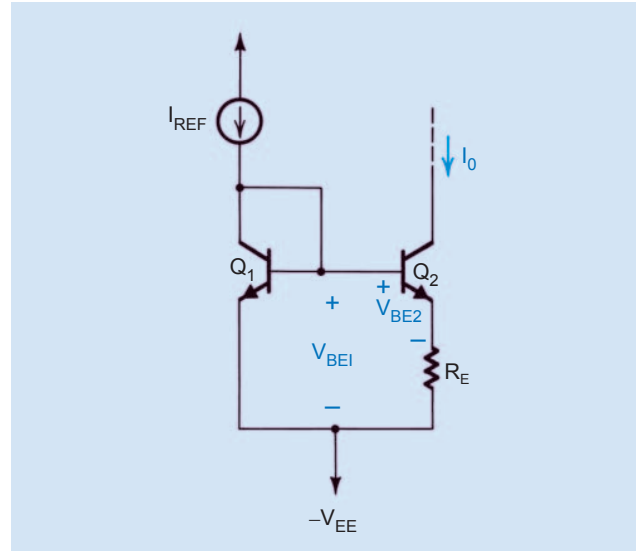


圖 11. 韋勒電流源<sup>(10)</sup>。

負載電流於感測電阻上所產生的差動電壓，轉換成單點對地的感測電壓。

由圖 11 分析  $Q_1$  與  $Q_2$  可得到

$$I_{REF} = \frac{V_{EE} - V_{BE1}}{R_E + R_C} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} V_B &= V_{BE1} + I_{REF} R_E \\ &= V_{BE2} + (I_0 + I_{Load}) R_{sense} + I_0 R_E \end{aligned} \quad (21)$$

將上式更改成公式 (18) 形式可得

$$\begin{aligned} V_{BE1} - V_{BE2} &= V_T \ln \left[ \frac{I_{REF}}{I_0} \right] \\ &= I_0 (R_{sense} + R_E) + I_{Load} R_{sense} - I_{REF} R_E \end{aligned} \quad (22)$$

因此

$$I_0 (R_{sense} + R_E) + I_{Load} R_{sense} - I_{REF} R_E = V_T \ln \left[ \frac{I_{REF}}{I_0} \right] \quad (23)$$

當  $R_E$  與  $I_{Load}$  為 0 時，公式 (23) 即還原成公式 (19)。

將相關元件數值帶入公式 (20) 中可計算得出  $I_{REF}$ ，再將此數值與  $R_{sense}$ 、 $R_E$ 、及  $I_{Load}$  帶入公式 (23) 中，然後利用嘗試錯誤法解出所欲得到的  $I_0$ ，

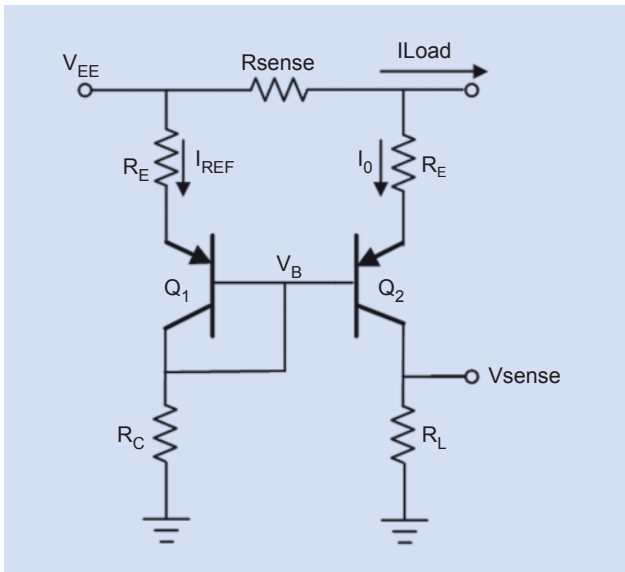


圖 12. 韋勒電流源架構的電流感測電路。

之後將  $I_0$  與  $R_L$  相乘即可得出負載電流所對應出來的電壓值。輸出端連接電晶體放大電路將此感測電壓作放大至合適的輸出範圍，並串接電壓隨耦器以防止後面電路的負載效應，其電路圖如圖 13 所示。

此電路之優點為：只要在電晶體的耐壓規格下，不管通道 (bus) 上的電源電壓為多少，皆能偵測此電流值，電路功能均能正常動作。缺點為：電路調整參數較多，另外在設計電流鏡電路時，其兩個電晶體之特性要相近，才能有較精確的輸出電流。

## (2) 過電流偵測電路

過電流偵測電路 (over-current detection circuit) 的功能：將電流感測電路所轉換電壓經由一比較器作電位準位的比較，只要輸入電壓  $V_{in}$  比參考電壓小，輸出電壓即被推至負的最大值；當輸入電壓比參考電壓大時，輸出即為正的最大值。

利用此特性，當電流轉換電壓大於參考電壓時，即代表現在的輸出電流已達到警戒電流值，也就是最大輸出電流值的 150%，此時過電流偵測電路立即輸出 OC 旗標至 FPGA，由它來關閉電源控制電路系統的輸出，以達到保護作用。

實際工作時，往往有若干雜訊出現在輸入端，這些雜訊疊加在輸入信號上，當輸入電壓等於參考

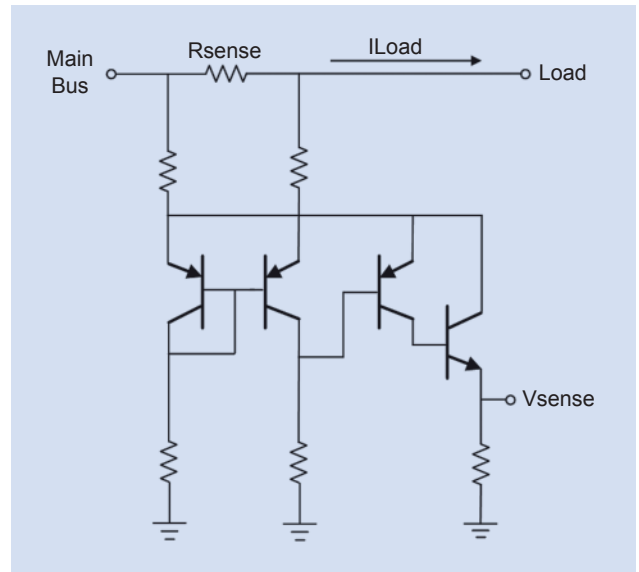


圖 13. 韋勒電流源電流感測電路。

電壓時，即會影響電壓的辨別，發生不穩定的狀況，使輸出產生閃爍不定的狀態。為消除此現象，可使用磁滯技術來解決此問題。

磁滯技術<sup>(13)</sup> 的轉換特性如圖 14 所示，當輸入電壓低於正臨界電壓 (positive threshold voltage) 時，輸出電壓保持在低穩態 ( $-V_{sat}$ )，但當電壓略高於正臨界電壓點 ( $V_H$ ) 時，輸出立即轉換成高穩態 ( $+V_{sat}$ )。同樣的若輸入電壓高於負臨界電壓時，輸出電壓保持在高穩態，當電壓略低於負臨界電壓點 ( $V_L$ ) 時，輸出立即轉換成低穩態。此兩端臨界電壓點可自行設計大小，決定所需的磁滯範圍。

為了實現具有磁滯技術的 OC 偵測電路，可利用非反相雙穩態複振器作設計，圖 15 為電路圖。因為所欲使用的比較器輸出端內部為開集極型式，因此外加一準位提升電阻於輸出端，以利於電路的驅動輸出。

為推導此電路的轉換特性，首先假設比較器  $V_+$  輸入電壓小於  $V_-$  電壓，輸出端  $V_0$  即為  $0\text{ V}$  ( $-V_{sat}$ )。此時電壓即可表示成

$$V_+ = V_{in} \frac{R_1' // R_2}{R_1 + R_1' // R_2} \quad (24)$$

$$V_- = V_{REF} \frac{R_5}{R_4 + R_5} \quad (25)$$

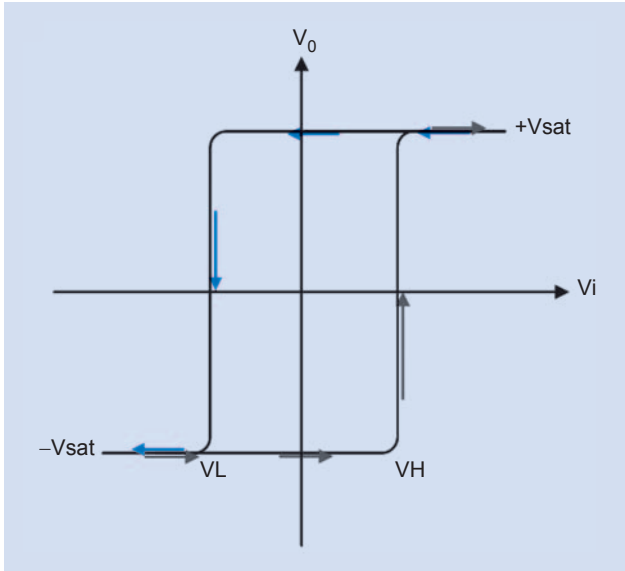


圖 14. 磁滯技術轉換特性。

為了觸發此電路進入  $+V_{sat}$  的狀態， $V_{in}$  電壓必須上升使得  $V_+$  等於  $V_-$ ，此臨界電壓即為  $V_H$ ，

$$V_H = V_{in} \frac{R_1' // R_2}{R_1 + R_1' // R_2} = V_{REF} \frac{R_5}{R_4 + R_5} \quad (26)$$

此時的  $V_{in}$  即為過電流偵測電路的正臨界電壓 ( $V_{oc+}$ ) 值，

$$V_{oc+} = V_{REF} \left( 1 + \frac{R_1}{R_1' // R_2} \right) \times \frac{R_5}{R_4 + R_5} \quad (27)$$

當  $R_5$  值為無限大時，

$$V_{in} = V_{oc+} = V_{REF} \left( 1 + \frac{R_1}{R_1' // R_2} \right) \quad (28)$$

第二步假設比較器  $V_+$  輸入電壓大於  $V_-$  電壓，此時輸出端  $V_0$  電壓即為  $V_{cc} (+V_{sat})$ 。 $V_+$  電壓即可表示成

$$V_+ = V_{in} \frac{R_1'}{R_1 + R_1'} + V_{cc} \frac{R_1 // R_1'}{R_1 // R_1' + R_2 + R_3} \quad (29)$$

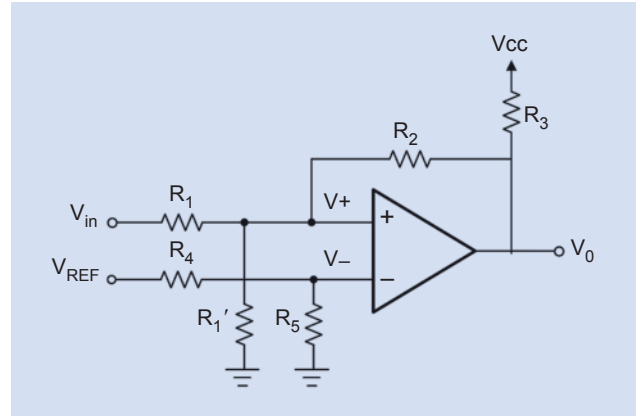


圖 15. 非反相雙穩態複振器。

同樣的為了觸發此電路進入  $-V_{sat}$  的狀態， $V_{in}$  電壓必須下降以使得  $V_+$  等於  $V_-$ ，此臨界電壓即為  $V_L$ ，

$$\begin{aligned} V_L &= V_{in} \frac{R_1'}{R_1 + R_1'} + V_{cc} \frac{R_1 // R_1'}{R_1 // R_1' + R_2 + R_3} \\ &= V_{REF} \frac{R_5}{R_4 + R_5} \end{aligned} \quad (30)$$

此時的  $V_{in}$  即為正臨界電壓 ( $V_{oc+}$ ) 值，

$$\begin{aligned} V_{oc-} &= \left[ V_{REF} \frac{R_5}{R_4 + R_5} - V_{cc} \frac{R_1 // R_1'}{R_1 // R_1' + R_2 + R_3} \right] \\ &\quad \times \frac{R_1 + R_1'}{R_1'} \end{aligned} \quad (31)$$

當  $R_5$  值為無限大時，

$$\begin{aligned} V_{in} = V_{oc-} &= \left[ V_{REF} - V_{cc} \frac{R_1 // R_1'}{R_1 // R_1' + R_2 + R_3} \right] \\ &\quad \times \frac{R_1 + R_1'}{R_1'} \end{aligned} \quad (32)$$

### (3) 電流監控電路

電流監控電路 (current monitor) 主要功能是用來監控每個次系統的工作時的輸出電流大小。如圖 16 所示，電路是使用非反相負回授放大器<sup>(14)</sup> 實

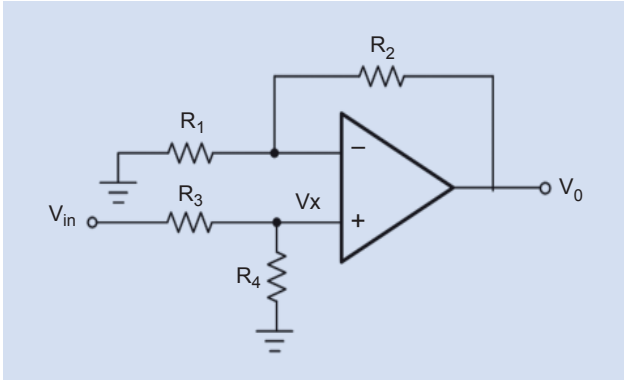


圖 16. 電流監控電路。

現，工作原理是將電流感測電路所轉換電壓範圍修正成從 0–4.8 V 階層，0 V 代表電流未輸出的狀態，4.8 V 代表輸出電流到達警戒電流值的轉換值。監控電壓可經由一 A/D 轉換器將轉換數值數位化，並利用演算法換算成實際電流的輸出值，提供及時的電流輸出數據資料。

電路的公式推導如下，

$$V_0 = V_x \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (33)$$

$$V_x = V_{in} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (34)$$

將  $V_x$  帶入公式 (33) 內整理後可得到

$$V_0 = V_{in} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \times \frac{R_4}{R_3 + R_4} \quad (35)$$

表 4. 限流保護電路設計規格。

LCL Type	Max Load (A)	Trip-off Load (A)	Latching Current Limit (A)	Max. Current Monitor Value (V) (@Trip-off Load)
A	0.16	0.24 ± 5%	0.80 ± 20%	4.72 ± 5%
B	0.36	0.55 ± 5%	1.80 ± 20%	4.87 ± 5%
C	0.91	1.36 ± 5%	4.50 ± 20%	4.81 ± 5%
D-1	1.36	2.05 ± 5%	8.0 ± 20%	4.83 ± 5%
D-2	2.94	4.41 ± 5%	8.0 ± 20%	4.80 ± 5%
E-1	4.55	6.82 ± 5%	12.0 ± 20%	4.80 ± 5%
E-2	7.27	10.91 ± 5%	12.0 ± 20%	4.80 ± 5%

#### (4) 限流保護電路

限流保護電路 (latch current limit, LCL)<sup>(15)</sup> 主要功能乃是當負載發生異常短路或電流超載時，能提供及時保護，利用此保護系統將輸入電流限制在負載設計所能接受的最大輸入值內，使得產品中的關鍵零組件不會因為過電流而造成毀損。限流保護電路發揮功能的同時，OC 旗標也會傳送至可編程邏輯陣列控制晶片，之後於設定的時間內關閉電源的輸出，直到電流恢復至可容許的範圍內。

依據每個次系統的規格的要求可將限流保護電路分成 7 個形式作設計，詳細規格如表 4 所示

## 四、保護電路量測

福衛五號 PCDU 保護電路因為電路結構相似，所以在此電壓保護的量測上，選擇 PR 電路系統內 UV 偵測電路的量測結果。電流的保護方面，選擇 PD 電路系統裡的 OC 保護電路作分析。

UV 偵測電路主要監控 DC 電路系統裡每個 DC-DC 轉換器的輸出電壓，根據表 2 的規格及圖 7 的電路，分別搭配不同的電阻值，好調整出能監控每個電壓值的個別偵測電路。量測的儀器方面，主要需要三組電源輸出的電源供應器，以及三用電表作電壓的量測。電源供應器是使用 AMREL PPS-2522，共兩台，以提供電源供應及模擬輸入電壓變化，三用電表是 Fluke 289 量測偵測電路的輸出旗標訊號，電壓值取至小數電第二位。

表 5. 外部直流電源轉換器輸出電壓 UV 偵測。

External DC	UV signal	+5.2 V		+15 V		-15 V	
	Spec.	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
	Spec.	< +4.81 V +0%, -2.5%	≥ +4.94 V +2.5%, -0%	< +13.875 V +0%, -2.5%	≥ +14.25 V +2.5%, -0%	> -13.875 V +0%, -2.5%	≤ -14.25 V +2.5%, -0%
	Test Value	+4.75 V	+4.95 V	+13.46 V	+14.30 V	-13.7 V	-14.30 V
	Pass	V	V	V	V	V	V

表 5 為外部直流電源轉換器的量測結果，每組 DC-DC 轉換器的 UV 偵測警戒均是以電壓輸出規格值的 90–92.5% 作為依據，當電壓進入此範圍值內，偵測電路需能立即輸出旗標訊號，待電壓恢復至規格電壓值的 95–97.5% 內時，偵測電路立即停止輸出旗標訊號。3 組 UV 偵測電路所量測到的結果均符合規格所規定。

PD 電路系統裡的 OC 保護電路，如同表 4 所示可依限流保護電路分成 7 個形式，所以在此以 Class C LCL 作為分析量測的範例，他的規格為輸出電壓  $28V \pm 5\%$ ，警戒電流為  $1.36 A \pm 5\%$ ，相對應警戒電流的監控電壓為  $4.81 V \pm 5\%$ 。當電流感測電路將警戒電流轉換成監控電壓的電壓值略大於 4.81 V 時 (磁滯效應)，非反相雙穩態複振器需在輸出端量測到 OC 旗標。

量測時需使用一電子負載，作為模擬衛星次系統的負載源。電子負載是使用 Agilent N3300A

(mainframe) 以及 N3305A (500W E-Load module)，此儀器可依所需條件設定成 PD 電路系統各個輸出端的模擬負載。表 6 為負載電流與監控電壓量測的結果，負載電流設定為 1.361 A 時，量測到的監控電壓為 4.776 V。因電路的磁滯效應，當負載電流大於警戒電流 (即 1.383 A) 時，相對應的監控電壓為 4.847 V，OC 保護機制被啟動，停止對負載輸出電流及電壓，因此監控電壓量測值立即為 0 V，此量測結果符合規格內所規定的誤差範圍內。從圖 17 中可觀測到曲線非常的線性。

當負載系統發生短路時，LCL 保護電路將被觸發。Class C 規格的限流保護電路設定為  $4.50 A \pm 20\%$ ，並於所設定的維持時間結束後，關閉輸出電流與電壓。將電子負載設定成輸入為 6 A 的負載作模擬，由量測圖形圖 18 所示，此時 LCL 保護電路立即將負載電流約維持在 4.85 A，並在 11 ms 後 FPGA 關閉電源輸出，量測結果符合設計的需求。

表 6. 負載電流與監控電壓量測結果。

Sink Current (A)	Load Current (A)	Sensing Voltage (V)
1.335	1.341	4.714
1.34	1.347	4.731
1.345	1.349	4.74
1.35	1.355	4.758
1.355	1.361	4.776
1.36	1.366	4.794
1.365	1.372	4.812
1.37	1.377	4.829
1.375	1.383	4.847
1.38	0.002	0.002

## 五、結語

保護電路的設計對 PCDU 內部電路系統提供了完善的防護機制，也讓每個使用 PCDU 電源的次系統能在規定的額定電流內得到安全的電源輸入。這些電流與電壓保護的電路設計原理並不複雜，所使用的雖為太空規格元件，但若更換成商用規格的編號，同樣為一般常用並可方便取得的標準元件。因此若將這些設計應用於商用的電子產品上的電源輸出與分配，尤其是產品上關鍵零組件的保護措施，例如：數位相機上的 CCD 感測元件、手機的充電電池、及 MP3 播放器的顯示面板等，均可提供商品安全的防護。

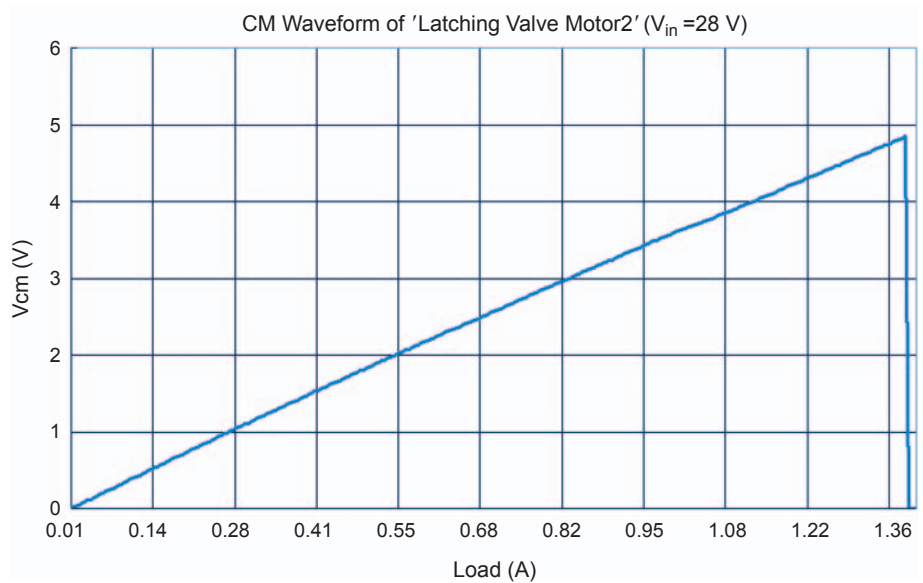


圖 17.  
監控電壓與 Sink 電流。

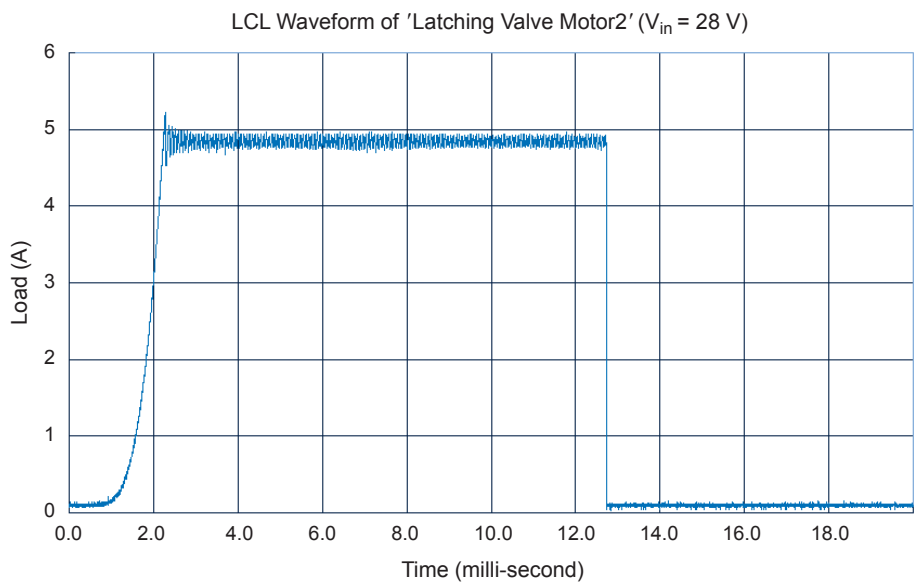


圖 18.  
LCL 保護電路量測結果。

目前福衛五號 PCDU 各個電路系統單板已完成獨自的功能驗證，並於組裝後，經由測裝系統進行工程體的整測。經由一連串的功能測試後，隨即也進行一系列太空環境測試，驗證其設計符合飛行品質標準。歷經過電磁相容測試及振動測試後，開始執行熱真空測試<sup>(16)</sup>，經歷 8 個熱真空溫度循環，反覆驗證 PCDU 在太空冷熱環境的功能運作正常，相關測試數據將提供未來飛行體之修正參考。此項測試的完成，象徵福衛五號計畫已由設計發展階段正式邁入元件製造測試階段。

## 參考文獻

1. <http://www.nspo.org.tw/2008e/projects/project5/intro.htm>
2. T. Markvart and L. Castaner, *Solar Cells: Materials, Manufacture And Operation*, Britain: Elsevier Science Ltd., 354 (2005).
3. P. Sen, *Power electronics*, 1st ed., Boston MA: McGraw-Hill, 14 (2004).
4. I. Kuon, R. Tessier, and J. Rose, *FPGA Architecture*, 1st ed., La Vergne: Lightning Source, 3 (2008).
5. <http://www.lammertbies.nl/comm/info/RS-422.html#intr>
6. R. A. Mack, *Demystifying Switching Power Supplies*, TX, USA: Elsevier Austin (2005).

7. S. T. Karris, *Electronic devices and amplifier circuits with MATLAB computing*, 2nd ed., Orchard (2008).
8. LM393, Data Sheet, National Semiconductor, <http://www.national.com/ds/LM/LM393.pdf>
9. F. L. Luo and H. Ye, *Advanced DC/DC Converters*, 1st ed., Florida: CRC (2004).
10. 黃哲政, 周世傑, 黃泰綸, 科儀新知, **32** (2), 85 (2010).
11. S. Sedra and K. C. Smith, *Microelectronic Circuits*, 4th ed., New York: Oxford University Press, 1024 (2004).
12. B. Razavi, *Design of analog CMOS integrated circuits*, Boston MA: McGraw-Hill, 141 (2001).
13. U. A. Bakshi and A. P. Godse, *Analog Electronics*, 1st ed., USA: Technical, A7 (2009).
14. R. Herrick, *DC/AC Circuits and Electronics: Principles & Applications*: Delmar Cengage Learning, 378 (2002).
15. E. Crandall, *Power Supply Testing Handbook: Strategic Approaches in Test Cost Reduction*, Kluwer Academic Publishing (1997).
16. <http://www.nspo.narl.org.tw/2011/tw/info/news.shtml?id=000384>



黃哲政先生為國立中央大學光電科學碩士，現任國家實驗研究院國家太空中心助理研究員。

Che-Cheng Huang received his M.S. in optical science from National Central University. He is currently an assistant researcher at National Space Organization, National Applied Research Laboratories.



葉嘉靖先生為國立成功大學物理學碩士，現任國家實驗研究院國家太空中心工程師。

Jia-Jing Yeh received his M.S. in physics from National Cheng Kung University. He is currently an engineer at National Space Organization, National Applied Research Laboratories.