

第四章

實體製作與實測結果

4.1 前言

為驗證本論文所提的內嵌式永磁同步機之可調速鎖相迴路控制器之可行性，在本章將實際製作一雛型系統，並測試其相關性能。其中硬體系統包含了內嵌式永磁同步電動機、反流器及、閘極驅動電路、電流偵測電路及其編碼器電路，而控制器則採用德州儀器(TI)所生產的 TMS320F2812 數位訊號處理器(DSP)作為核心單元，並結合萊迪斯半導體(Lattice Semiconductor)所生產之現場可程式化邏輯閘陣列(FPGA)作為鎖相迴路之邏輯運算，接著依據第三章之設計準則，完成控制器製作。

4.2 功率電路製作

為減少實體電路制作之時間，吾人先規劃好整個系統架構模組，再分別完成各個模組電路，並逐一測試各電路之功能正確與否，然後依序建構統合後再進行整體系統之測試，接著有關軟體方面，則依據吾人所提出之新型鎖相迴路控制策略，撰寫數位訊號處理器內部程式與場可程式化邏輯閘陣列之硬體描述語言。在內部程式的偵錯階段，可使用數位-類比轉換器(DAC)，並配合示波器以觀察數位訊號處理器內部資料是否正確，而場可程式化邏輯閘陣列將利用邏輯分析儀進行功能驗證。然而，德州儀器公司(TI)目前所推出 TMS320F2812 之 eZdsp

評估模組並無內建數位-類比轉換器，故吾人尚必須自行建構一數位-類比轉換器模組，此模組將於稍後說明。圖 4.1 所示為本論文所提出之內嵌式永磁同步電動機之可調速鎖相迴路控制器系統架構圖。其中，驅動系統之直流電源係使用致茂公司 (Chroma) 之型號為 6230K-150 可程式直流電源供應器，輸出額定為 150V/20A，反流器之六開關乃採用 IGBT CM100DY-24H 功率半導體元件，其最大耐壓與耐流分別為 1200V 與 100A。由上述資料可知，此一功率電路足夠驅動吾人所使用之內嵌式永磁同步電動機。

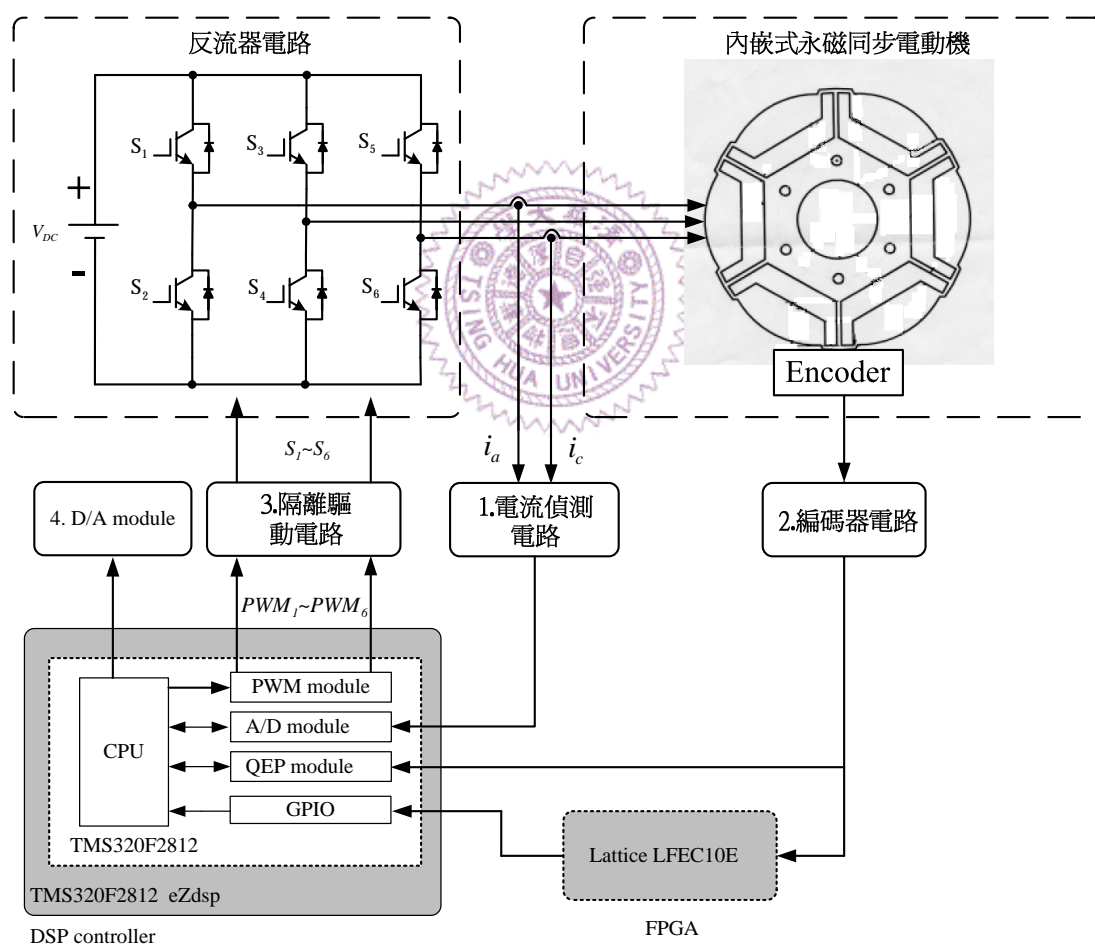


圖 4.1 內嵌式永磁同步電動機驅動系統

吾人將分別說明在圖 4.1 中各區塊之硬體電路，如下所示：

1. 電流偵測電路

由圖 4.1 所示之內嵌式永磁同步電動機驅動系統可知，在電流回授部分只取 i_a 和 i_c ，而 i_b 可由計算得知，此二電流回授之電路原理相同，故在此以一組電流偵測電路作為說明，如圖 4.2 所示，其利用型號為 LA25-NP 之霍爾感測器(Hall Sensor)作為隔離之電流偵測，接著再透過運算放大器作電壓增益調整、直流準位提升以及濾除高頻雜訊，再送至數位信號處理器 TMS320F2812 之類比/數位轉換模組。除此之外，由於類比訊號的準位會隨著環境因素而產生飄移，所以系統在每次啟動時必須在程式內部作類比-數位轉換器模組歸零的動作。關於 TMS320F2812 內建之類比-數位轉換器模組的細節可參考文獻 [38]。

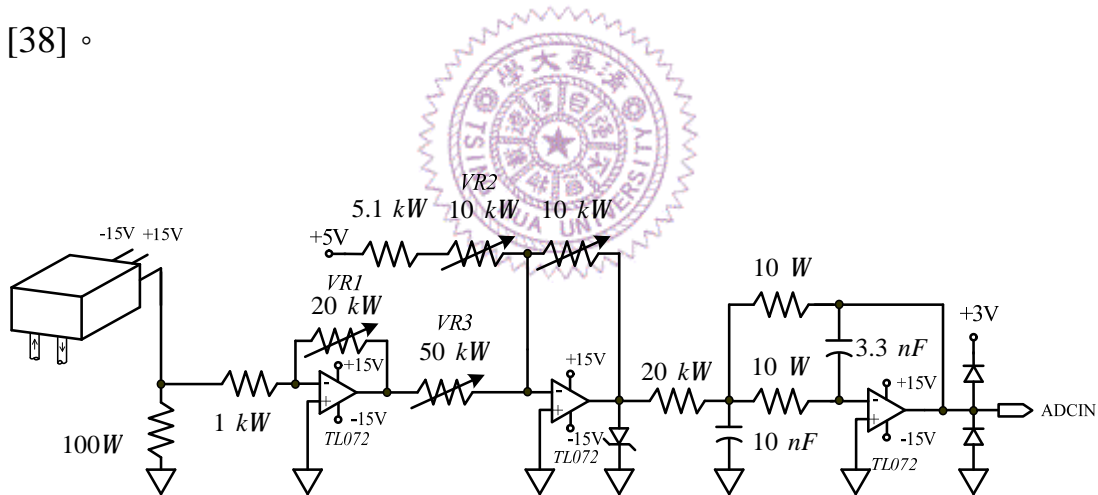


圖 4.2 電流偵測電路

2. 編碼器偵測電路

本論文所使用編碼器每旋轉一週能夠產生兩組 2000 個脈波的方波訊號(a 、 \bar{a} 及 b 、 \bar{b})，這兩組方波訊號為相差 90 度，正轉時為 a 領先 b 九十度，此時轉速編碼器的計數器為向上數；反轉時為 b 領先 a 九十度，此時轉速編碼器的計數器為向下數，此外每旋轉一週會產生一個脈

波的方波訊號(z 、 \bar{z})，吾人可藉由 z 方波訊號來決定轉子磁極的位置。 a 、 b 脈波訊號提供給數位訊號處理器(DSP)之四象限轉速編碼器(QEP)單元做數位訊號處理，經過轉速編碼器(QEP)單元後轉子每轉一週在DSP內的計數器將從零計數到八千。因為一週有360度所以其解析度為360除以八千，因此有很高的解析度，然而此三組脈波訊號可能會因為電動機旋轉磁場的干擾或是類比電路的雜訊影響而造成轉速的估測誤差，這是因為如果解碼器所產生的方波訊號雜訊過大將會使數位訊號處理器(DSP)之轉速解碼器(QEP)單元產生誤判而影響轉速估測，所以在解碼器與數位訊號處理器(DSP)之間亦額外增加了一組介面電路，如圖4.3所示為 a 、 \bar{a} 這組訊號處理之電路圖，而 b 、 \bar{b} 和 z 、 \bar{z} 也相同。此介面電路提供轉速解碼器(QEP)所需的3.3伏特直流電壓，並且使用了三顆高速光耦合 IC-6N137 作為類比電路和數位電路之間的隔離電路，因為隔離了類比端和電動機端的雜訊，所以可以獲得比較正確的轉速脈波。

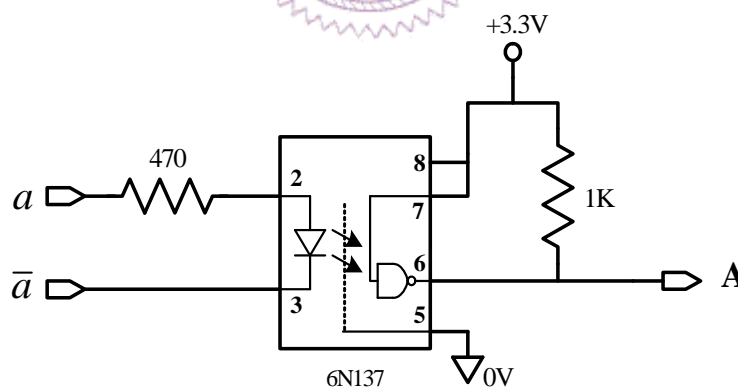


圖 4-3 轉速偵測電路

3. 閘極隔離驅動電路

在三相反流器驅動電路部分，由於部分開關元件(如 IGBT)不共

地，因此以光耦合放大器 TLP 250 做為隔離驅動電路。如圖 4.4 所示，因有六組相同原理之電路，故在此只舉一組驅動電路做為說明。其由 DSP 內建之脈波寬度調變模組產生之控制信號 $PWM_1 \sim PWM_6$ ，經光耦合放大器 TLP 250 作為隔離驅動，再送至限流電阻以驅動 IGBT 之用。

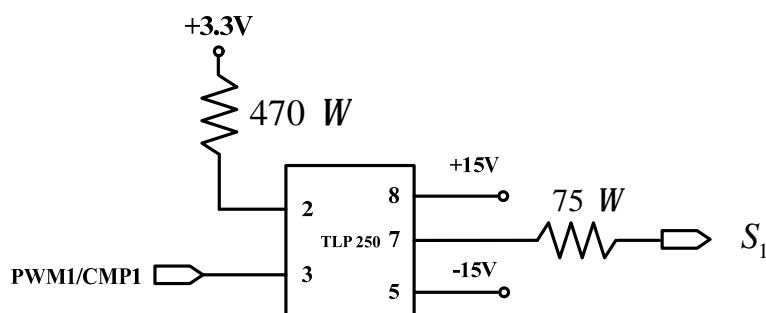


圖 4.4 隔離驅動電路

4. 數位-類比轉換器(DAC)

吾人使用之數位-類比轉換器晶片為 Burr-Brown 所生產之 DAC7725，其輸入為 12 位元，四個通道，輸出最大範圍是 -10~+10，轉換設定時間為 10ms，其電路如圖 4.5 所示。

5. 現場可程式化邏輯閘陣列

吾人以 FPGA 實現鎖相迴路之 PFD 邏輯運算，其運算結果將回傳給 DSP 做為電流迴圈之轉矩控制，其中以雙向記憶體做為溝通介面。為增加鎖相的穩定度使用除頻器將電動機編碼器降為每轉 100 個脈衝訊號。

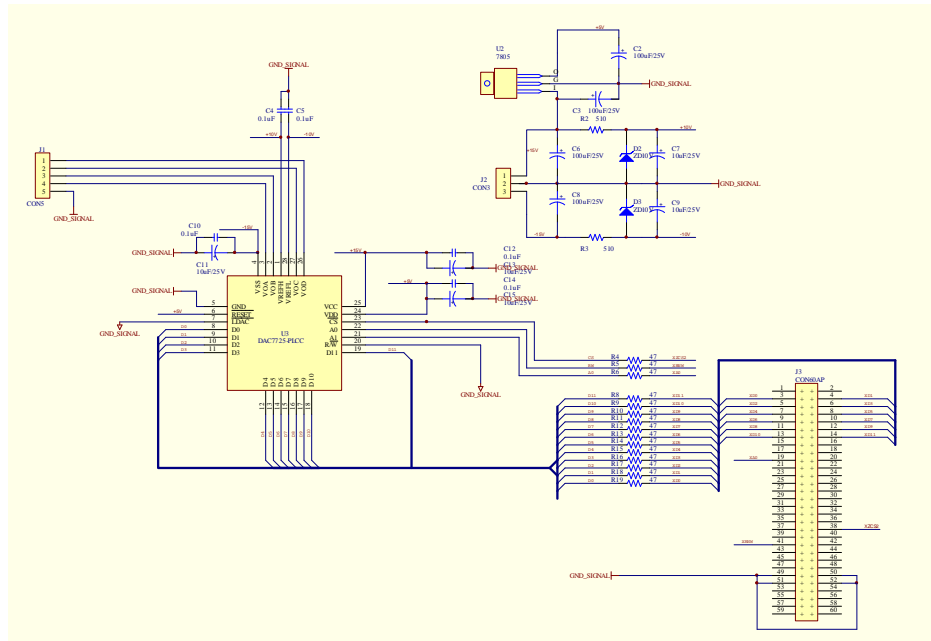


圖 4.5 數位-類比轉換器電路圖

4.3 控制器製作

吾人之新型鎖相迴路控制器將以數位控制實現，數位控制具有下列諸多優點：(1) 系統的穩定性提高，減少飄移；(2) 整合性強；(3) 使用之零件相對減少，維護容易，可大幅降低維護成本；(4) 雜訊隔離能力強；(5) 容易更改控制法則，適合應用在開發階段之產品。且微處理器工作頻率愈來愈快，雖然仍不若類比控制器快，但由於機械的響應緩慢，其應用在機電整合領域上已將當足夠。

吾人選用德州儀器公司(TI)之數位訊號處理器 TMS320F2812 作為核心單元。其市場定位於電力電子與電動機控制等領域，因此已內建脈波寬度調變(PWM)模組以及類比-數位轉換器(ADC)等模組，故僅需簡易設定暫存器即可使用，其具有之特色如下所述：

- (1) 屬為 32 位元之處理器。
- (2) 最高工作頻率為 150 MHz。
- (3) 有 16 組脈波寬度調變(PWM)訊號。
- (4) 具有 16 個通道的 12 位元類比-數位轉換器。
- (5) 有七個計數器，包含三個 32 位元處理器計數器(CPU Timer)與四個 16 位元通用計數器。
- (6) 有 6 個捕捉單元(Capture Unit)，可切換為兩組 QEP。
- (7) 共有 56 個 GPIO 介面。
- (8) 具有 40kB 的隨機存取記憶體(RAM)。
- (9) 周邊暫存器使用 C 語言結構封裝，設定方便。

圖 4.6 為各週邊電路與數位訊號處理器之資料傳輸方塊圖，其中電流偵測電路偵測目前輸入電動機的 a、c 相電流大小後，即可透過 TMS320F2812 數位訊號處理器內建之 ADC 將 0~3V 之類比訊號，轉換成以二進位表示的數位訊號，分別儲存在兩組 12 位元數位取樣結果儲存器(ADCRESULT0、ADCRESULT1)中，以回授給電流控制器。編碼器產生之脈波訊號經由光耦合電路可得到三組位置脈波訊號，透過數位訊號處理器內建的第一組 QEP，偵測其中 a、b 相脈波訊號正/負邊緣，產生每轉 8000 次的脈波訊號，並觸發第二計數器(T2CNT)，依據 a、b 兩相脈波訊號超前或滯後關係，來判斷正轉或反轉。接著得到電動機磁極位置，吾人先量測電動機磁極位置與編碼器 z 相脈波訊號之夾角，得知夾角大小後吾人便可藉由 z 相脈波訊號來矯正電動機之磁極位置，以供轉換參考座標之計算。

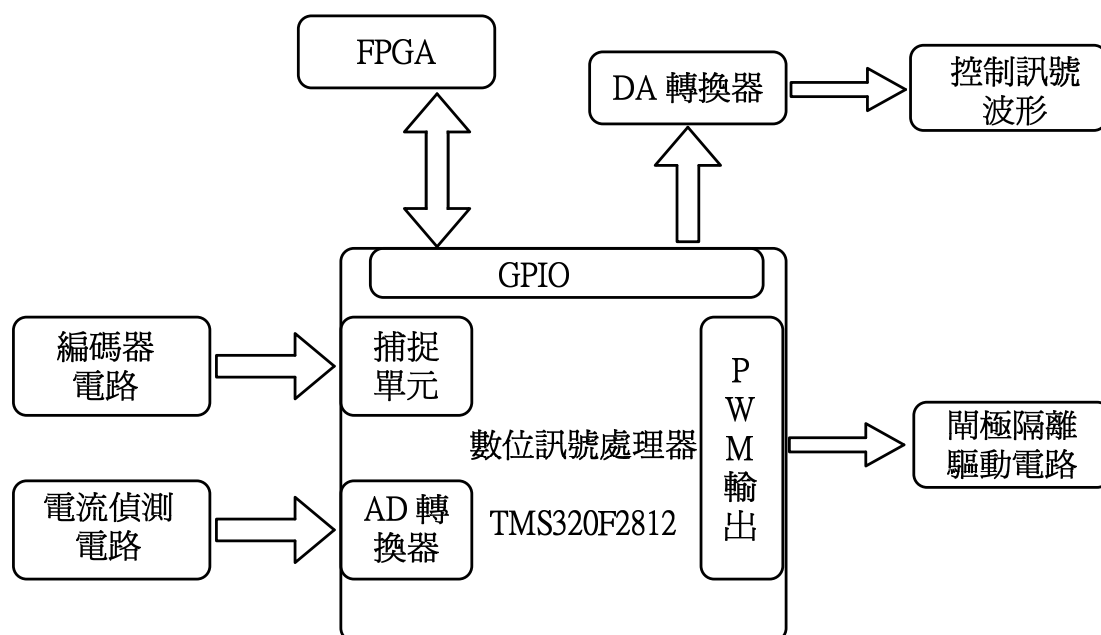


圖 4.6 各週邊電路與數位訊號處理器之資料傳輸方塊圖

在獲得即時的電動機定子電流與轉子磁極位置之後，即可對內嵌式永磁同步電動機進行場導向控制。吾人下達所需之轉速命令後，此轉速命令與現在電動機轉速之差，即為轉速誤差訊號，將誤差訊號傳給速度比例積分控制器即產生轉矩命令，另一方面，鎖相控制迴路亦會產生適當之轉矩命令，加速鎖相之暫態響應。兩轉矩命令在加上估測之轉矩前饋補償可得到最後的總電磁轉矩命令，經數位訊號處理器將轉矩命令轉換成直軸、交軸電流命令後，交由電流迴圈做控制。直、交軸電流迴圈控制器依據電流誤差產生所對應之電壓命令，並將電壓命令座標轉換後，得到需要的三相電壓，藉由輸出 PWM 訊號至閘極驅動電路，分別控制六顆功率開關的導通與截止，使反流器產生所需之三相電壓。

然而在實作控制器程式的過程中，難免需要經歷測試、除錯等動作以對程式之缺失加以調整改進，此時可使用吾人建構之 DAC7725

數位-類比轉換器，利用軟體程式選擇所需觀察的數位訊號，利用數位-類比轉換器轉換成-10 至+10V 的類比電壓訊號，如此即可透過示波器觀察目前的控制訊號波形，用以檢驗控制程式之正確與否。

圖 4.7 所示為數位訊號處理器之程式流程圖，其中主要包含主程式流程圖和中斷服務常式流程圖，在主程式運作中，主要是要將 DSP 作一初始化的動作，其包含運作環境設定、控制參數中各項變數之初始值設定、ADC 模組之初始化設定、QEP 模組初始化設定，PWM 模組初始化的動作、中斷服務常式控制暫存器設定和等待中斷迴圈等。在中斷服務常式中，主要由 GP timer1 之連續上數/下數模式來產生中斷(在此設定其中斷頻率為 20kHz)，於產生中斷後進入服務常式中，其先抓取 A/D 轉換模組所儲存之電流訊號 i_a 、 i_c 轉換至定子兩相座標。而在電動機位置取樣方面，由於速度控制迴路與電流控制迴路響應速度的差異，在取得電流取樣值之後需利用計數器之數值來判斷動作，因此設定每執行二十次電流迴路控制後執行一次速度控制迴路，速度迴路控制包含了傳統比例積分控制器與鎖相迴路控制器，鎖相迴路之 PFD 使用硬體描述語言(VHSIC Hardware Description Language, VHDL)實現於 FPGA 內，DSP 將由外部 IO 介面經由雙相記憶體和 FPGA 溝通，以下達 VCO 之參考頻率命令並讀取 PFD 之輸出結果，PFD 輸出將回傳給 DSP 中的相位控制器做誤差補償。接著計算電動機轉子磁極位置所在，以供場導向控制所需之座標轉換訊息，因此在轉子座標下即可進行電流迴路之控制與計算，並將運算之結果產生 PWM 控制信號，經由 PWM 模組輸出開關切換信號，最後離開此中斷服務常式，回到程式無窮迴圈中等待下次中斷。

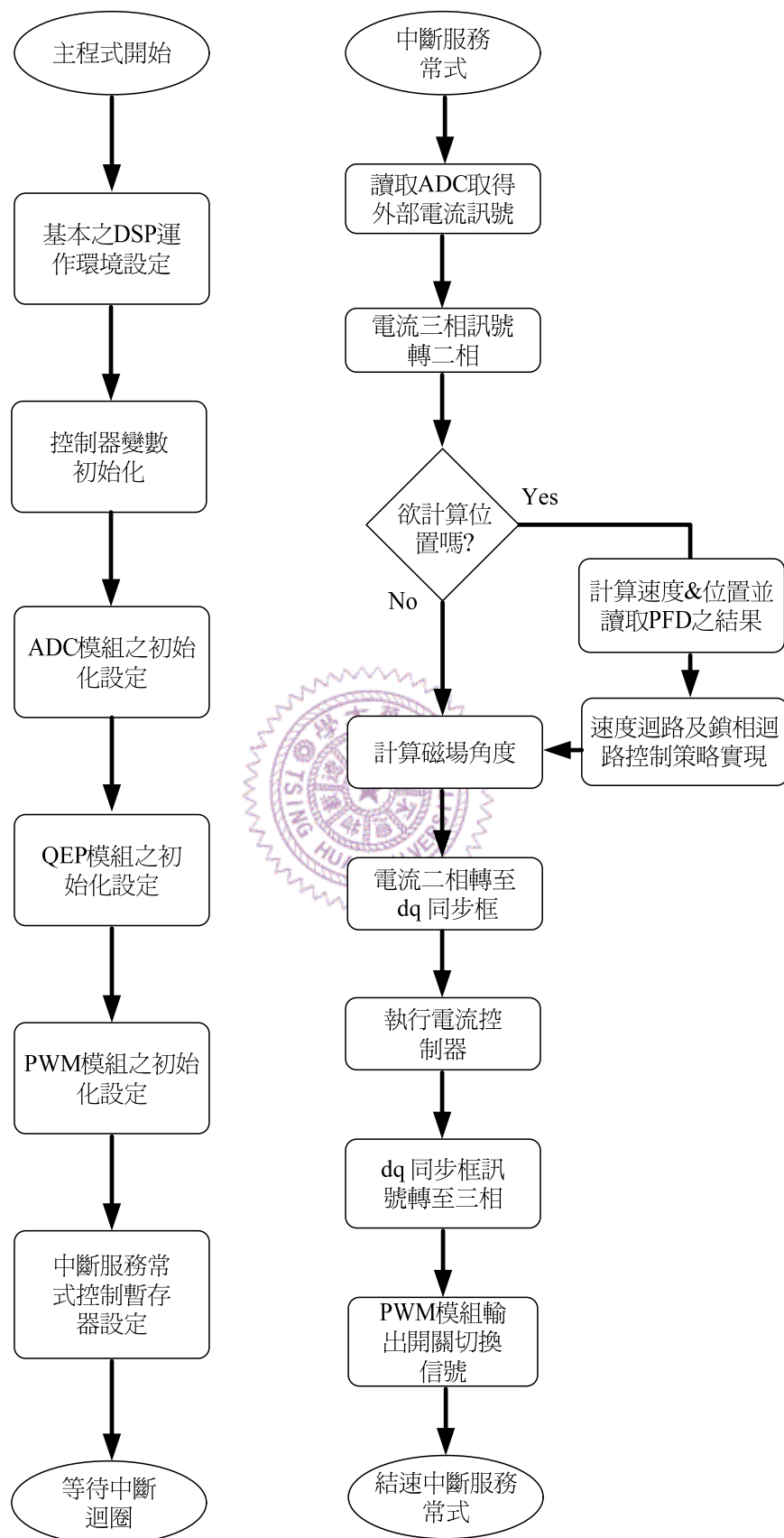


圖 4.7 程式流程圖

4.4 實測結果

為驗證本論文所提之新型鎖相迴路速度控制器之可行性，根據前一章節所規劃之各電路模組進行硬體電路之製作，於製作完成後，先對各電路模組進行測試，經確定功能無誤之後再加以整合，最後完成內嵌式永磁同步電動機驅動器硬體電路雛形與內嵌式永磁同步電動機機電模組，如圖 4.8 和圖 4.9 所示。

系統之軟體程式與硬體電路繁雜龐大，為逐一驗證雛型電路功能之正確性，將分別測試速度迴圈及電流迴圈功能是否正確。首先測試電流迴圈功能，吾人下達轉子座標直軸電流迴圈與交軸電流迴圈之步階命令，量測電流迴圈響應結果，在下達直軸電流命令 $i_{ds}^{r*}=3.82\text{A}$ ，其步階響應結果如圖 4.10 所示，由圖 4.10 可知直軸電流迴圈約於 1m sec 可達到穩態，追到所下達的直軸電流命令。同樣以下達交軸電流命令 $i_{qs}^{r*}=3.82\text{A}$ ，其步階響應結果如圖 4.11 所示，由圖 4.11 可知交軸電流迴圈同樣可於 1m sec 可達到穩態。由於速度迴圈取樣頻率為 1m sec，因此速度迴圈所下達的直軸、交軸電流命令，電流迴圈控制器約於 1m sec 左右可使直軸、交軸電流追到命令。

由於本論文採用第二章所介紹的的轉矩控制策略，因此吾人下達一線性上升之轉矩命令，測量由本論文轉矩控制策略所產生的轉子座標直軸、交軸電流結果，並以橫坐標為直軸電流，縱座標為交軸電流繪製於圖 4.12，由於內嵌式永磁電動機的磁阻轉矩必須藉由負的直軸電流來產生，故依據圖 4.12 所示在所有轉矩產生過程中皆有使用到磁阻轉矩，充分利用內嵌式永磁電動機之優點。

接下來吾人測試速度迴圈之功能，藉由下達轉速步階響應並觀察其結果，首先吾人在無載的情況，下達轉速命令 $w_s = 239.7 \text{ rad/sec}$ ，其響應結果如圖 4.13 所示。圖 4.13 中一開始直軸電流、交軸電流皆進入飽和使電動機產生最大的轉矩全力加速，當接近轉速命令時直軸、交軸電流隨即下降，電動機轉速約於 0.8 sec 左右追到轉速命令，由負直軸電流量可知，在轉矩輸出過程中，充分利用內嵌式永磁電動機之磁阻轉矩。接著吾人以負載轉矩 1 N-m 負載下，下達轉速命令 $w_s = 239.7 \text{ rad/sec}$ ，其響應結果如圖 4.14 所示。圖 4.14 中一開始直軸電流、交軸電流同樣進入飽和使電動機產生最大的轉矩全力加速，因為有外加負載，上升時間較無負載情況長，電動機轉速約於 1 sec 左右追到轉速命令。

最後測試整合速度迴路與鎖相迴路之速度控制器在各種情況下之轉速響應，首先測試無載情況下之轉速響應，吾人分別下達 500rpm、1000rpm、2000rpm 及 3000rpm 之轉速命令並量測轉速響應之穩態結果，其結果如圖 4.15、圖 4.16、圖 4.17 及圖 4.18 所示，圖中由上而下分別為 F_s 、 F_r 與 PFD 之輸出訊號，要特別說明的是吾人在此以數位邏輯訊號代表 PFD 之輸出。其結果皆可藉由鎖相迴路達到零頻率誤差。接著測試加載時之穩態轉速響應，吾人將負載電動機外接電阻當成發電機使用。速度控制器分別下達 500rpm 及 1000rpm 之轉速命令，其結果如圖 4.19 及 4.20 所示，即使在加載的情況下，依然可達到零頻率誤差之效果。

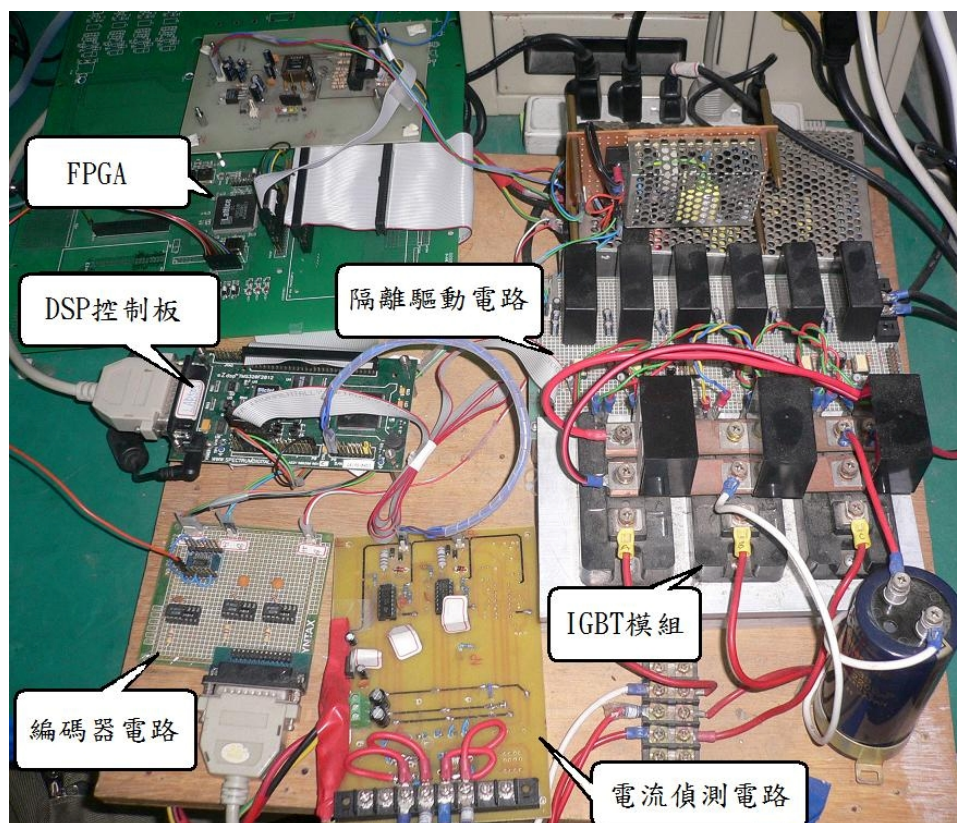


圖 4.8 內嵌式永磁同步電動機驅動器硬體電路雛型

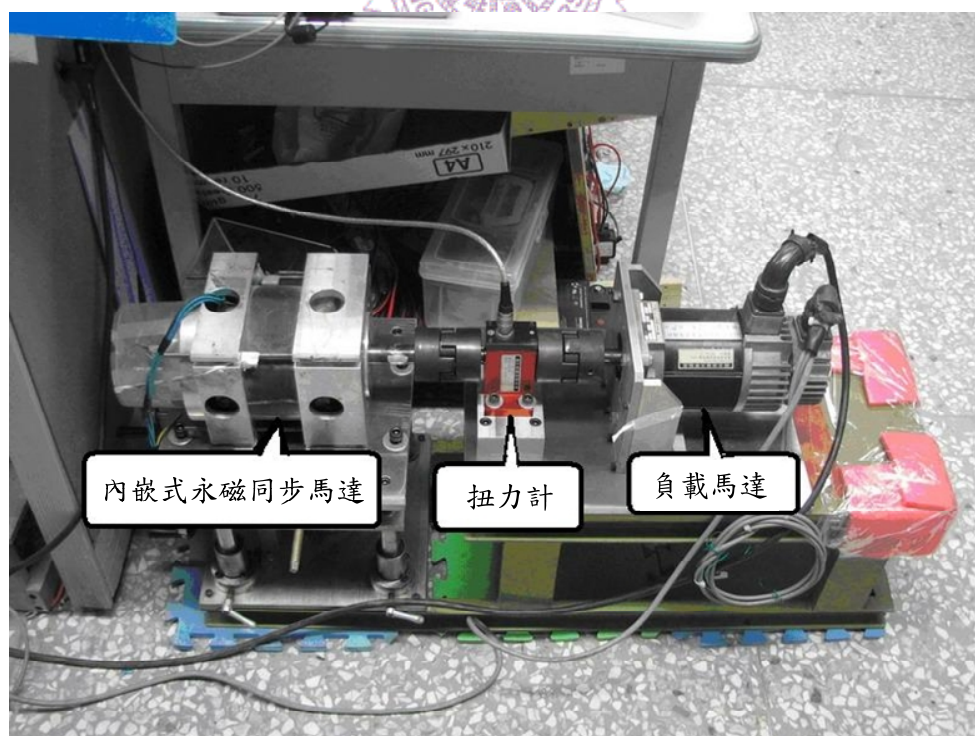


圖 4.9 內嵌式永磁同步電動機機電模組

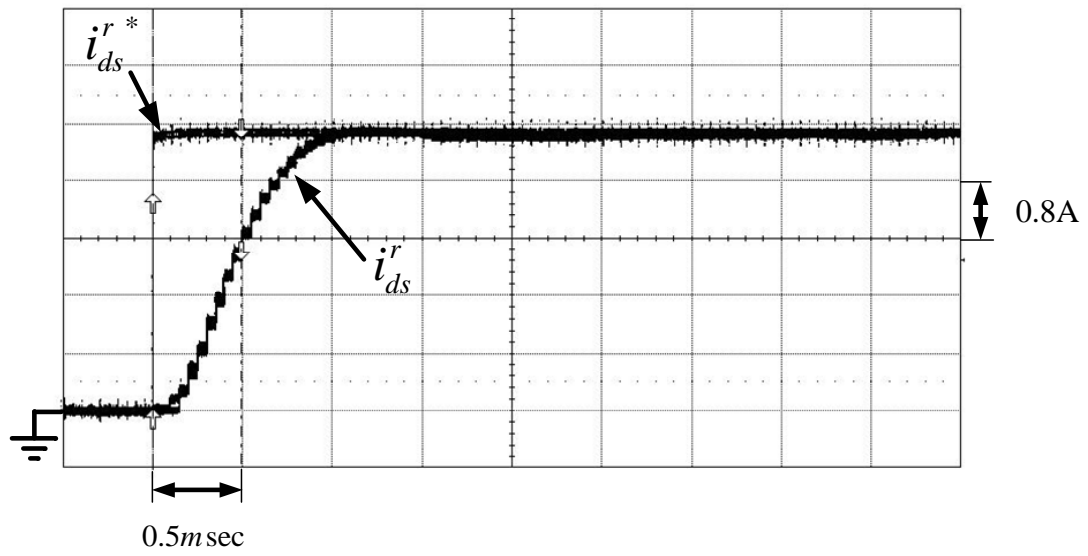


圖 4.10 轉子座標直軸電流之步階響應($i_{ds}^{r*}=3.82\text{A}$)

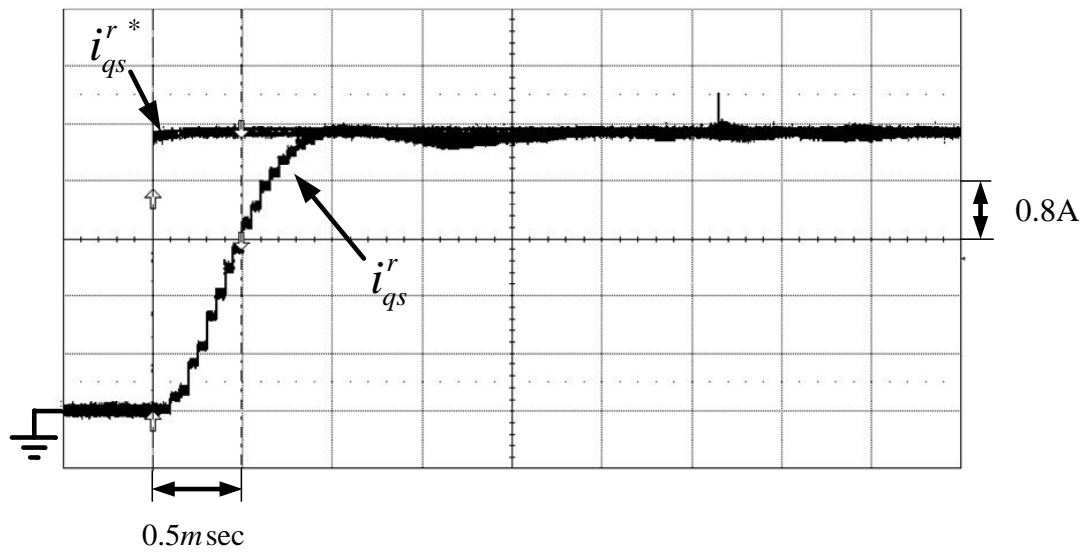


圖 4.11 轉子座標交軸電流之步階響應($i_{qs}^{r*}=3.82\text{A}$)

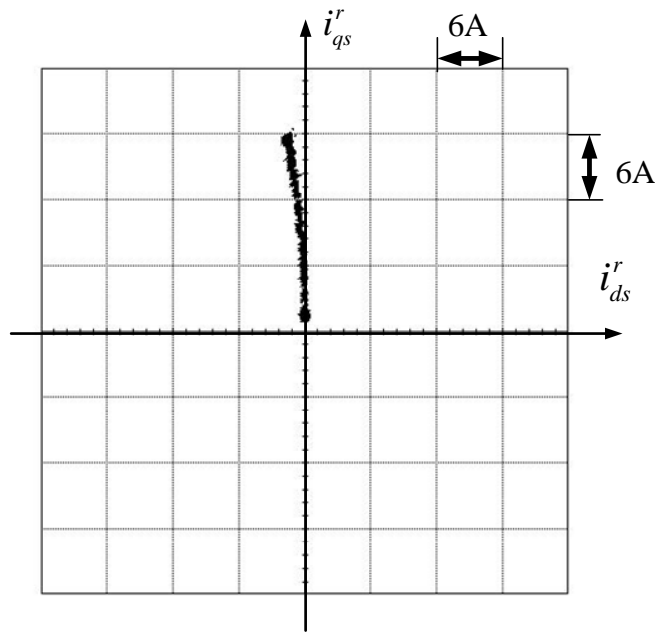


圖 4.12 以線性上升之轉矩命令產生的轉子座標直軸、交軸電流

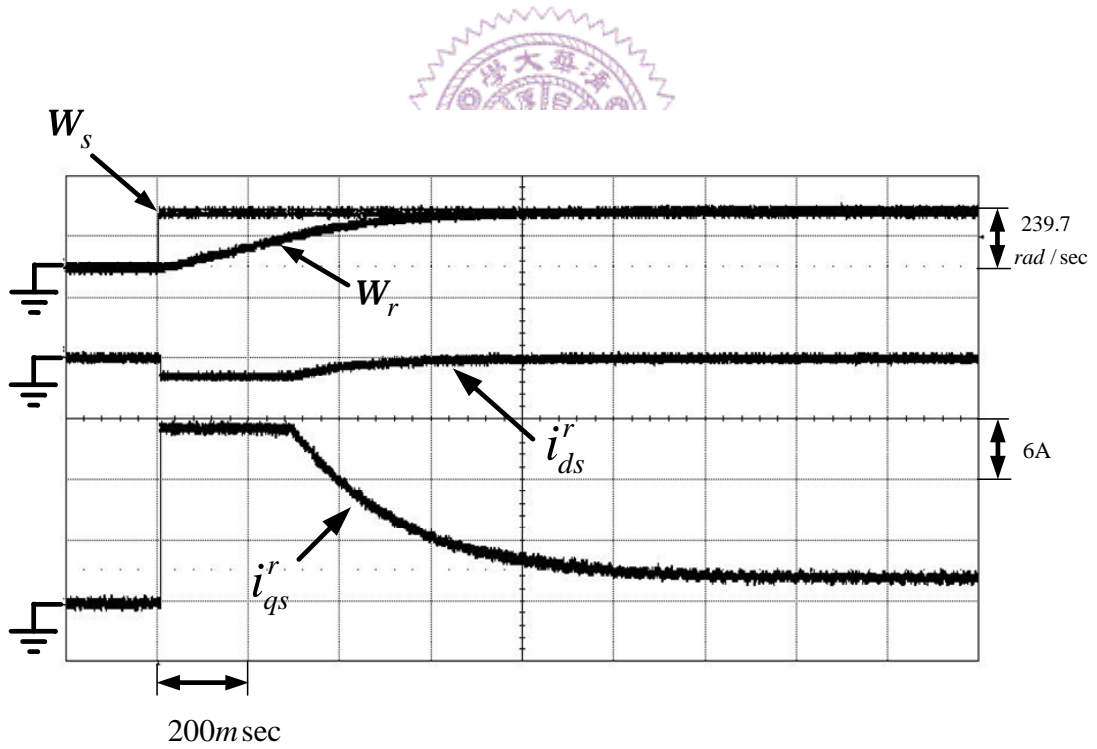


圖 4.13 轉速步階響應與轉子座標直軸電流、交軸電流

$$(w_s = 239.7 \text{ rad/sec} , T_{Load} = 0 \text{ N-m})$$

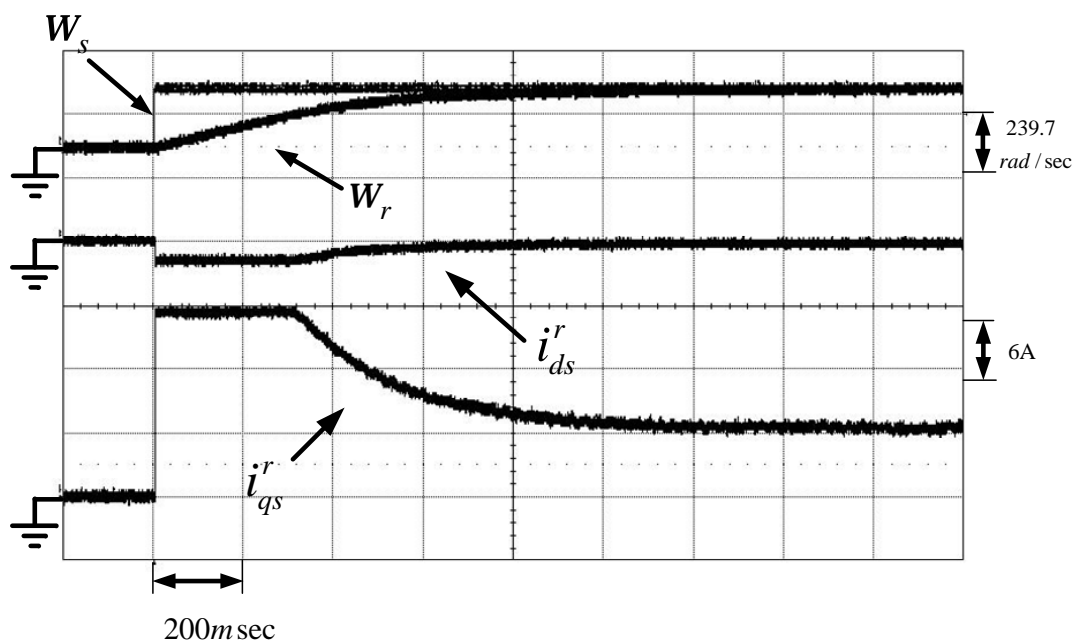


圖 4.14 加載下之轉速步階響應與轉子座標直軸電流、交軸電流

$$(w_s = 239.7 \text{ rad/sec}, T_{Load} = 1 \text{ N-m})$$

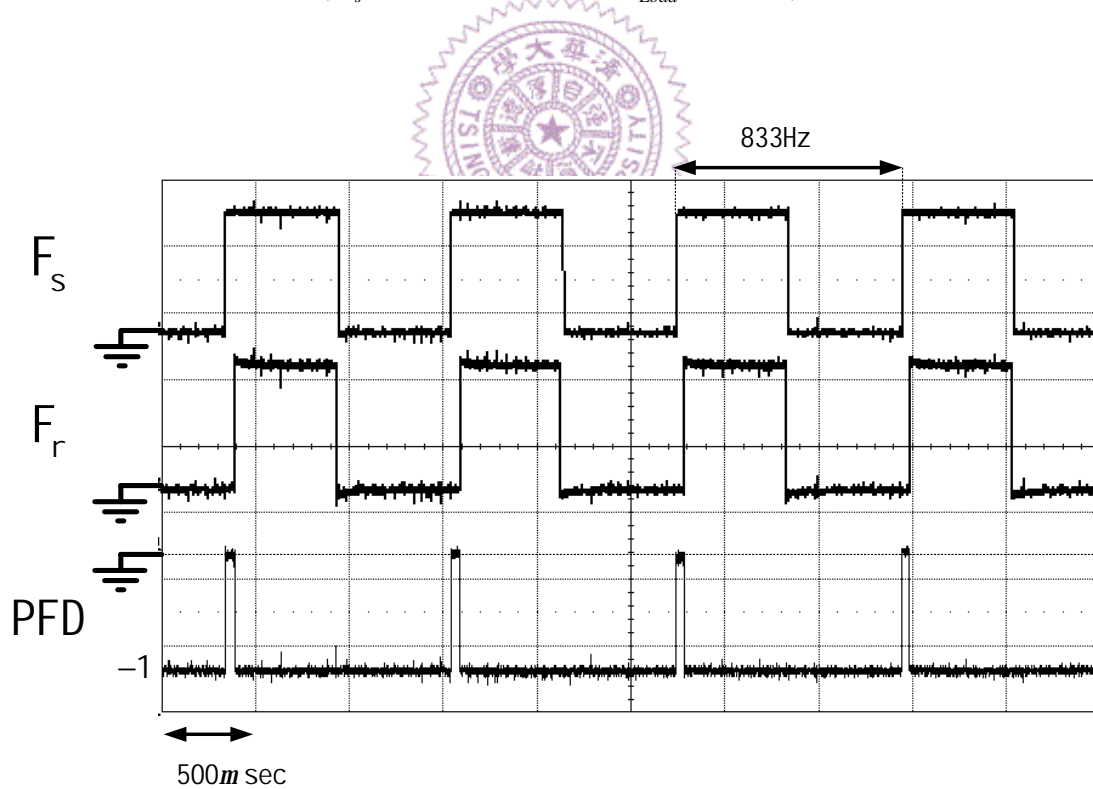


圖 4.15 無載下，轉速命令 500rpm 之鎖相結果($F_s=833\text{Hz}$ ，)

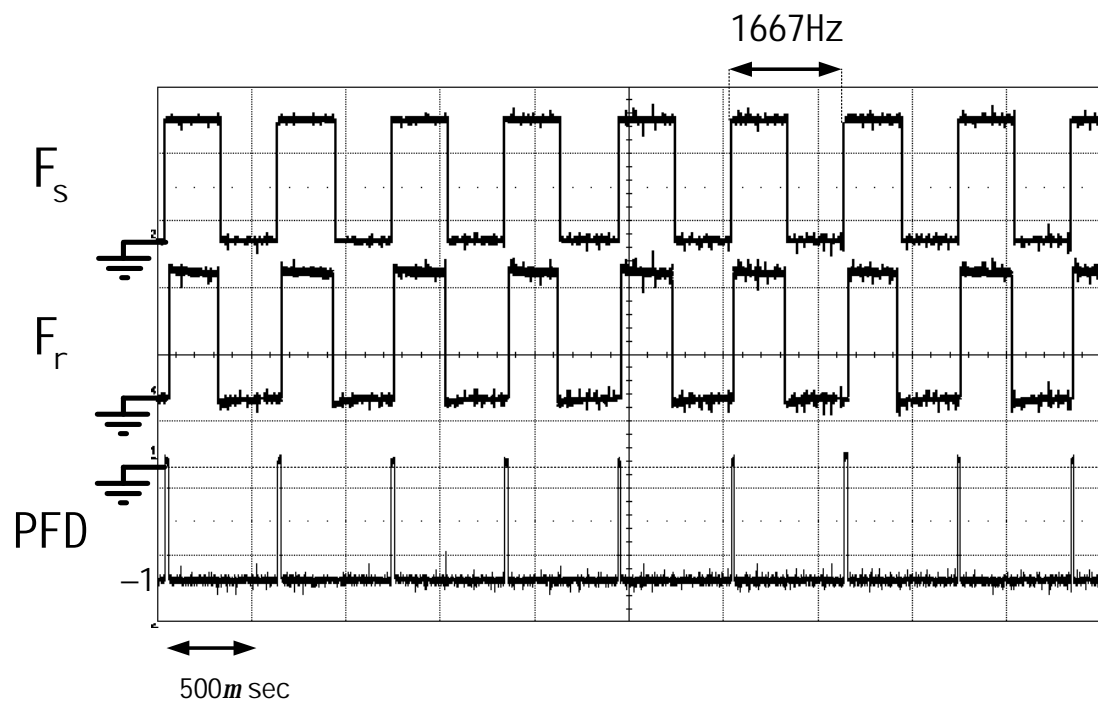


圖 4.16 無載下，轉速命令 1000rpm 之鎖相結果($F_s=1667\text{Hz}$,)

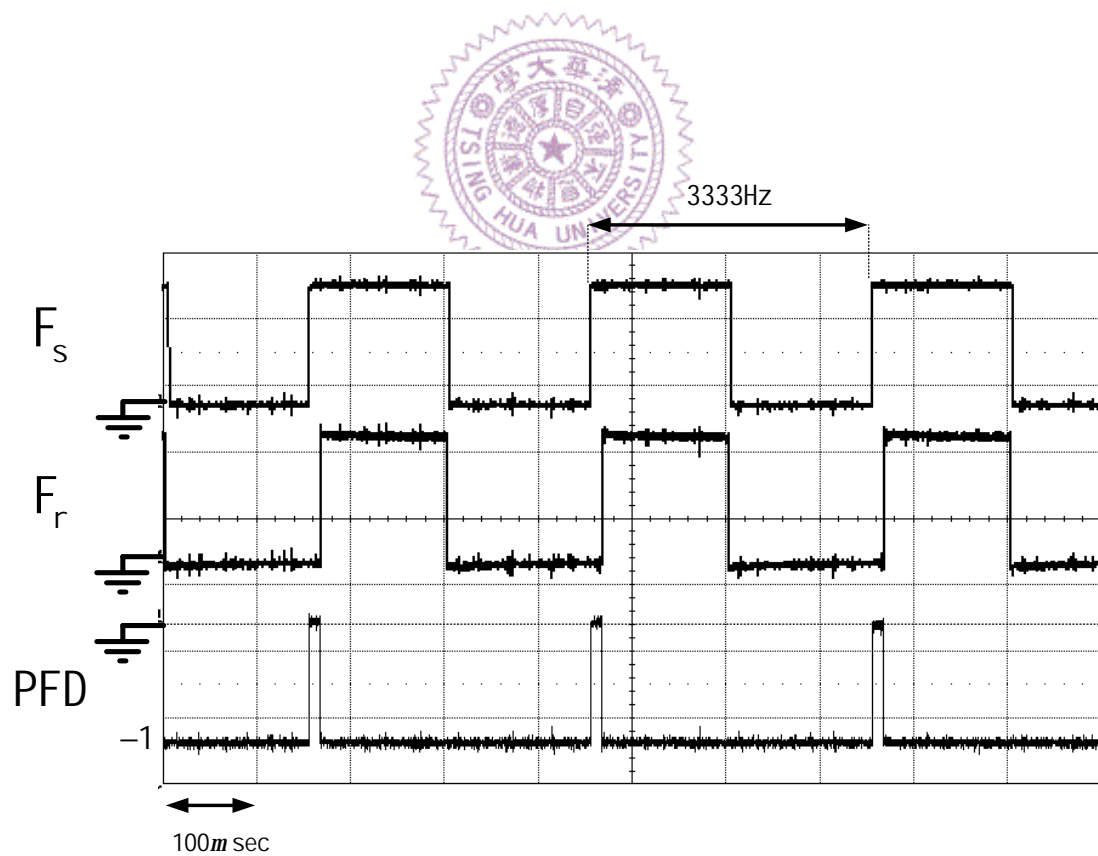


圖 4.17 無載下，轉速命令 2000rpm 之鎖相結果($F_s=3333\text{Hz}$,)

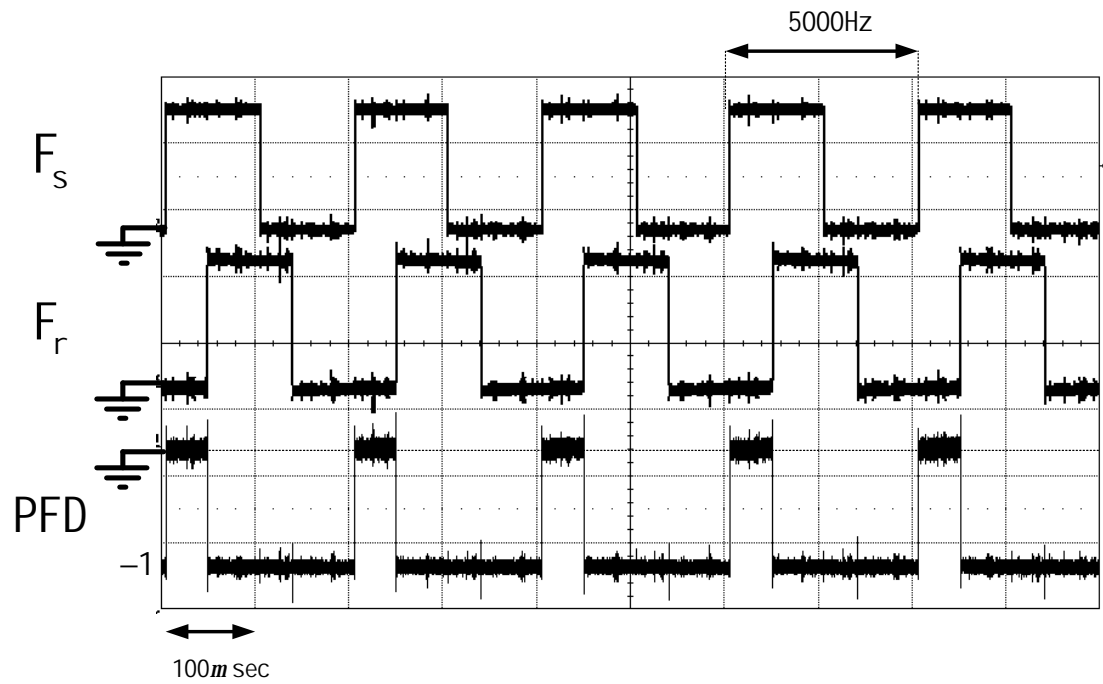


圖 4.18 無載下，轉速命令 3000rpm 之鎖相結果($F_s=5000\text{Hz}$,)

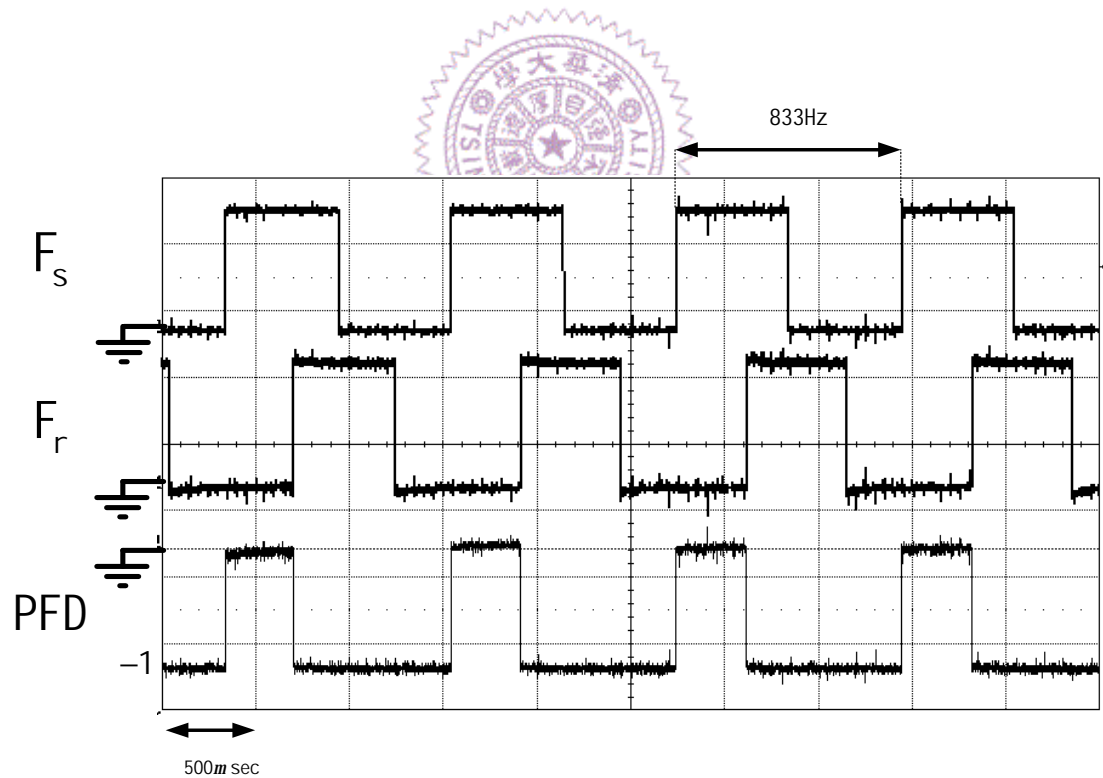


圖 4.19 有載下，轉速命令 500rpm 之鎖相結果($F_s=833\text{Hz}$,)

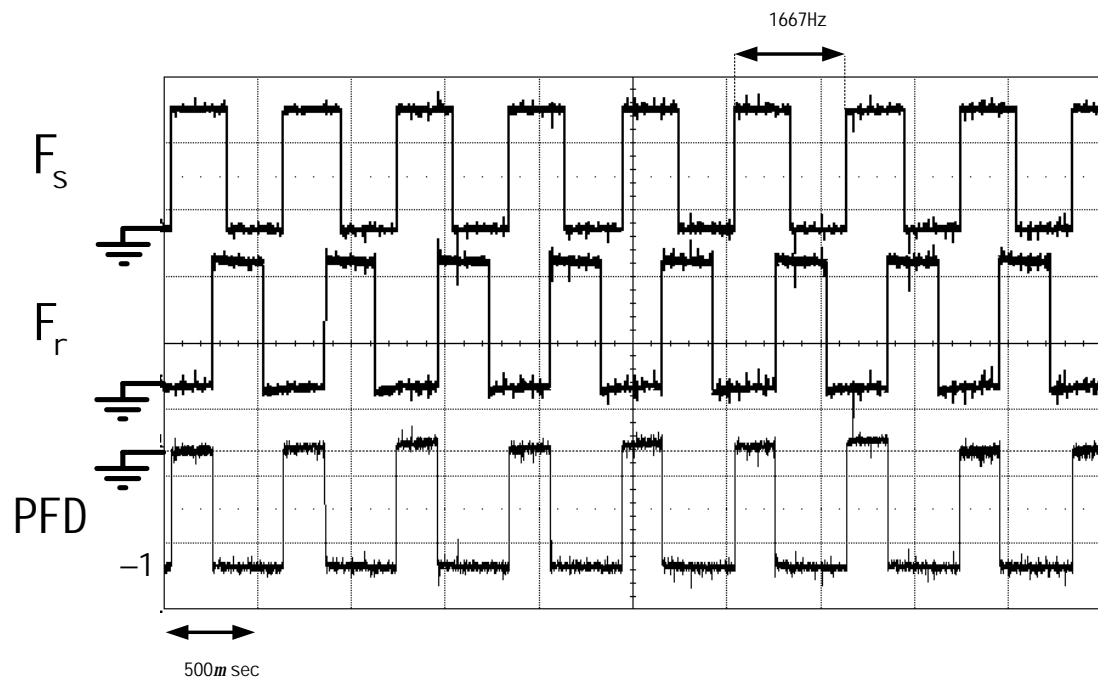


圖 4.20 有載下，轉速命令 1000rpm 之鎖相結果($F_s=1667\text{Hz}$,)

