



BLDC 设计活动作品报告书

团队：转动未来

作品：电动卷帘驱动器

日期: **110 年 07 月 19 日**



目录

一、计划内容.....	4
1.1 项目背景及目的.....	4
1.2 项目作品规格.....	5
二、卷帘应用系统介绍.....	6
2.1 系统规划及架构说明.....	6
2.2 卷帘机构设计.....	7
三、马达驱动器设计.....	9
3.1 BLDC 马达参数.....	9
3.1.1 马达电气参数.....	9
3.1.2 Hall-effect sensor 讯号对位与接线.....	9
3.2 BLDC 控制器设计.....	10
3.2.1 BLDC Drive 系统架构.....	10
3.2.2 IMC-101T 周边线路设计.....	11
3.2.4 IMC-101T 参数设计.....	13
3.2.5 S-curve 控制.....	14
3.2.6 Script 程序流程图.....	16



3.3 无线功能设计.....	16
3.3.1 无线模块系统架构.....	17
3.3.2 无线模块控制功能.....	18
3.3.3 APP 界面规划.....	20
四、系统性能评估.....	21
4.1 卷帘机实体成果.....	21
4.2 驱动器测试波形.....	22
4.2.1 相电流与电流相位.....	22
4.2.2 效率.....	23
4.2.3 加/减速时间.....	24
4.2.4 最低转速控制.....	25
4.3 控制卡线路图与零件表.....	26

一、计划内容

1.1 项目背景及目的

根据 IEA 国际能源总署统计—马达用电占据全球用电量高达 46%，因应节能需求与自动化工厂、智能建筑发展趋势，全球马达市场规模预测约每年达到 6~7% 趋势持续成长。各厂商纷纷投入研发高效可控的 BLDC 马达与驱动器方案，投入各个新领域应用场合(ex. 智慧建筑/工厂)与逐渐取代上世代的解决方案(ex. 气动/柴油引擎手工具、农具...)。基于整体市场的趋势，也鉴于明纬近年跨入智能建筑等应用，由 manufacturer 转成为 solution provider 的角色，未来跨足 BLDC drive 市场将可大幅扩展明纬在电源解决方案上的深度与广度。

BLDC 马达具有高效率、小型化与可控制(变频)的特性，传统 AC 单相感应马达的效率约 40~60%，使用 BLDC 则可提升至 70% 以上。然而 BLDC 必须搭上适配的驱动器才可驱动，成本也较感应马达高。也因此必须推出高性价比、高效率的 BLDC drive 在市场取得竞争力。

本项目实作一个可搭配 WIFI 通讯的 BLDC 驱动器，具备宽转速范围操作，并且搭配低成本的 Hall-effect digital sensors 的 BLDC 马达，应用于电动卷帘机系统中。此外本项目作品搭配 FOC 架构达到适当的电流控制，使 BLDC 在不同机械负载下可使用相对较小的电流驱动，降低 BLDC drive 的功率损耗。并且在控制功能方面提供可控制正/反转的转速设定功能，提供用户以外部电压进行调速应用；转矩限制功能提供输出转矩调整，对于不要求瞬时高转矩输出的应用，可藉由软件调整转矩限制大小，来得到更平滑的加速效果，亦能避免过大的转矩输出所产生的应力，导致负载失效或损坏。

1.2 项目作品规格



图 1 BLDC-300 搭配无线模块与外置天线



图 2 大厅展示布幕升降控制应用

表 1 卷帘机项目规格

驱动器效率	93% @300W(drive output)
马达效率	80% @250W(motor output)
额定电流	1.2Arms
加/减速时间	<1.5 sec (静止加速至额定 1200 RPM@no-load)
最大驱动电流	200% 额定电流可持续 5 sec
转速控制范围	100~1200 RPM
转速调节率	<+/-1.5%(额定转速)
软件设定功能	<ol style="list-style-type: none"> 1. 输出转矩限制(预设 200%Io(rated)) 2. S-curve 转速缓启动功能
驱动器功能	<ol style="list-style-type: none"> 1. 转速控制及转矩限制 2. 正反转控制 3. 简易加减速 S-curve 控制 4. WIFI 远程监控 5. 应用: 大厅展示布幕升降控制(图 2)

二、卷帘应用系统介绍

2.1 系统规划及架构说明

本专题除实作 BLDC 控制方法外，并搭配卷帘系统的运动模式设计马达控制参数与机构，发展卷帘机的 BLDC 控制系统，并搭配使用 WIFI 模块与 APP，可对 BLDC 驱动器进行变频控制、开/关机等功能，达成远程控制卷帘之目的。图 3 为专题提出之系统架构图。

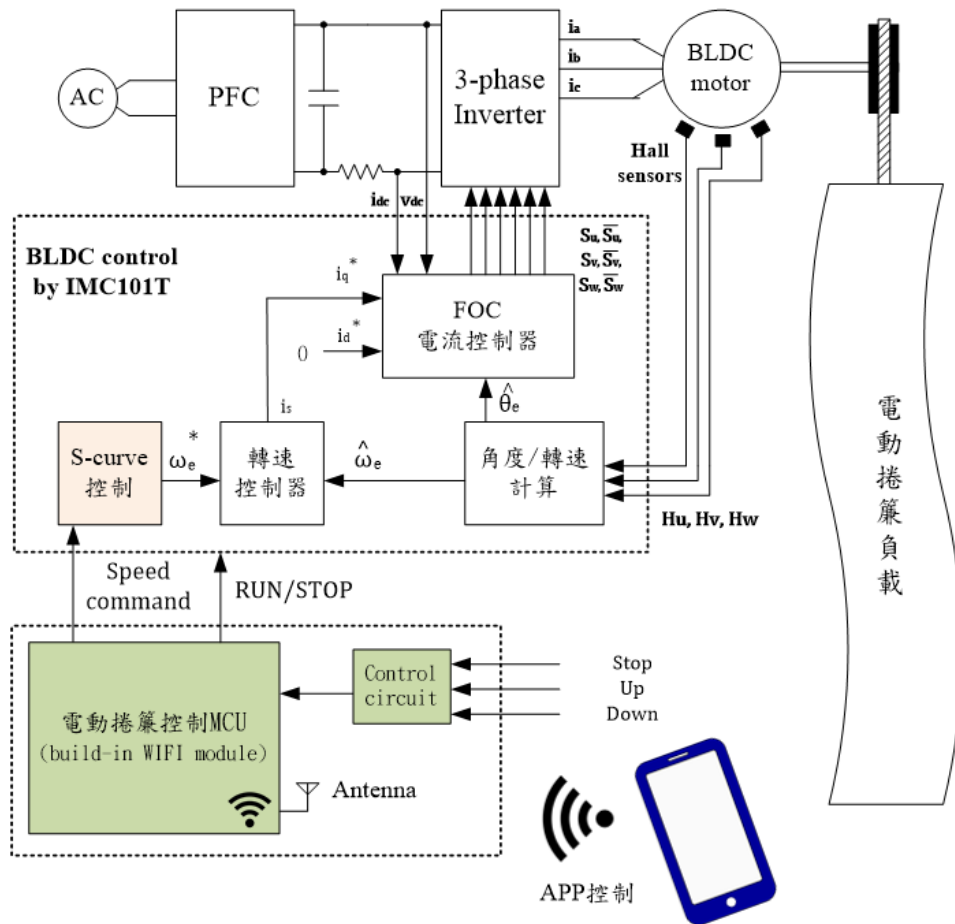


图 3 电动卷帘控制系统图

2.2 卷帘机构设计

为快速验证所提电动卷帘控制策略，因此购置卷扬机成品与悬吊机构及惰轮进行组立，如图 4；图 5 为 BLDC 搭配驱动器(BLDC-300)之组立实体，主要组成部件及其功能如表 2。

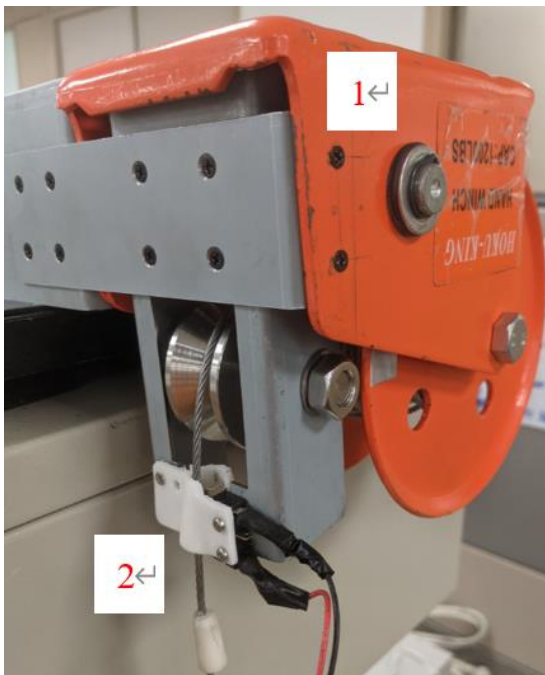


图 4 卷扬机本体与限制微动开关



图 5 BLDC 及驱动器(BLDC-300)模块

表 2 BLDC 卷帘机构的主要组件功能说明

项目	名称	说明
1	卷扬机	将钢索卷收与下放
2	微动开关	限制钢丝卷收线长，当钢索收至碰触到微动开关可触发 BLDC-300 停机
3	BLDC-300	BLDC drive
4	野力 YBL-6S-148	动力马达，带动卷帘机运转
5	聚圣 MF60X-L1-3	配合卷帘机低速应用，减速比 3
6	Hall-effect sensor 转换接口	马达输出之 Hall-effect sensor 位置讯号与 BLDC-300 间的电气转换接口

图 6 卷帘卷轴的负载需求转矩计算, 其中卷帘重量为 10kg 可由转轴半径(0.02m)计算出需求转矩为

$$T_{load} = 10 * 9.8 * 0.02 = 1.96 \text{ (N-m)} \quad (1)$$

马达减速机与卷扬机的减速比个别为 4.2 与 3, 总减速比 m 为 12.6, 减速机构之合并减速比与换算理想条件下入力轴(马达输出至机构端)所需扭力 T_{input} 为约为 0.156Nm

$$m = 4.2 * 3 = 12.6 \quad (2)$$

$$T_{input} = \frac{1.96}{12.6} = 0.156 \text{ (N-m)} \quad (3)$$

卷帘机钢丝升降速度需求约 0.2m/s, 推算马达转速 N_{input} 为 1200RPM 左右

$$N_{input} = \frac{0.2}{0.02 * 2\pi} * 60 * 4.2 * 3 = 1203 \text{ (RPM)} \quad (4)$$

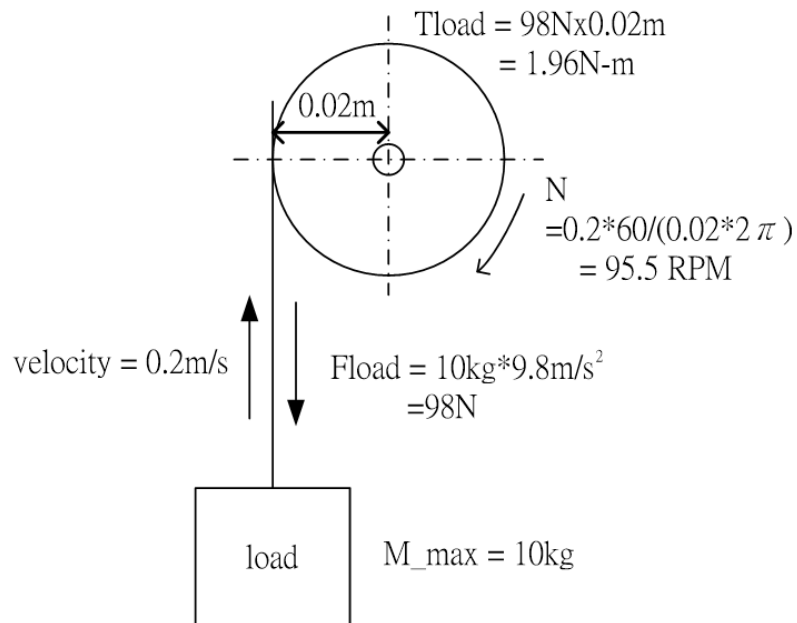


图 6 卷帘卷轴机构负载计算(不含减速机构)

三、马达驱动器设计

3.1 BLDC 马达参数

本节说明马达的基本参数与其参数测量结果，与三相霍尔讯号的量测方式。作为 BLDC 驱动器的设计依据。

3.1.1 马达电气参数

马达相关电气参数根据野力原厂提供资料如下，BLDC 相关控制参数根据下表 3 进行设计。

表 3 BLDC 参数量测表

参数	数值	单位
极数 Poles	8	-
反电势常数 K_e	0.1815	Vrms(ψ)-s/rad
等效 d 轴电感 L_d	0.0106	H
等效 q 轴电感 L_q	0.0107	H
转矩常数 K_t	0.5444	N-m/A
相电阻 R_s	3.5	Ω

3.1.2 Hall-effect sensor 讯号对位与接线

本专题使用三相 Hall-effect sensor 讯号作为马达转轴角度位置的依据，使 FOC 控制时能将电流控制于与反电势同相位，亦即定转子磁场正交，将电能有效转化为机械能。因马达厂商一般不会主动提供 Hall-effect sensor 讯号与反电势的相位关系，故需实际量测 Hall 讯号相位，才能与马达驱动器匹配使用。

专题依控制 IC—IMC-101T 定义的反电势与 Hall-effect sensor 位置讯号相位关系，并确认实际马达三相反电势与 Hall 讯号的关系与驱动器定义一致才可启动。图 8 为 IMC101T 的 Hall-effect sensors 讯号定义，其 UV 线对线反电势与 Hall1 在正相序下的相位关系，Hall1 落后 UV 线反电

势 150 度，另控制 IC 定义输入的位置讯号 Hall1~3 各相差 120 度。以主动式负载带动待测马达 (正转)，实测马达 HallU~W 信号与 UV 反电势如图 9。可知实际驱动器 Hall1 应接至 HallW 才可对应至驱动器定义之相位关系，依相位相差 120 度关系定义 Hall2 接 HallV，Hall3 接 HallU。

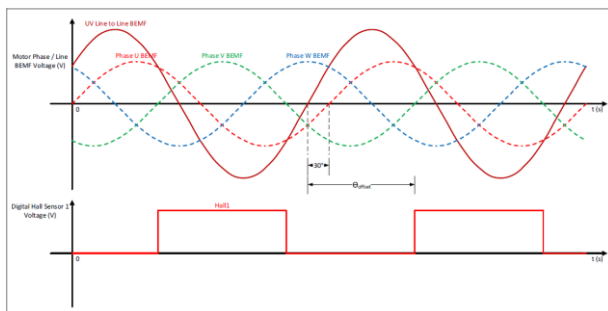


图 8 IMC101T Hall signal 与 BLDC 三相电压相位定义

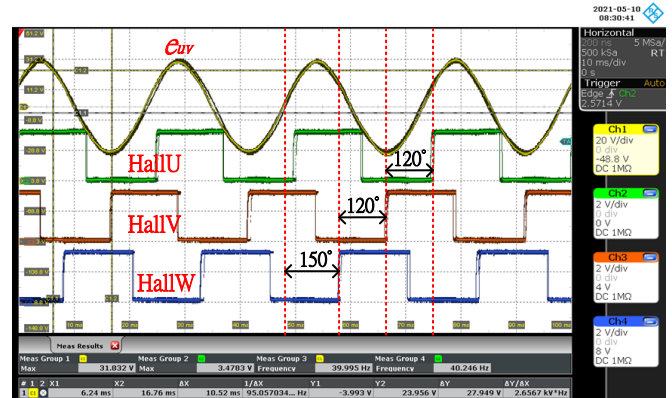


图 9 量测 UV 反电势与马达 Hall 讯号关系

3.2 BLDC 控制器设计

3.2.1 BLDC Drive 系统架构

图 10 为控制架构示意图，BLDC 控制核心使用 IMC101T-T038 内建 PMSM 控制算法，并采用三个 Hall-effect sensor 讯号作为马达位置回授，藉此达成 FOC 的控制，始马达可精确将电流输出在正确的相位，提供较小的驱动电流。在转速控制方面，将转速命令加入 S-curve 加速曲线，改善原本 Ramp 加减速曲线的启动应力。

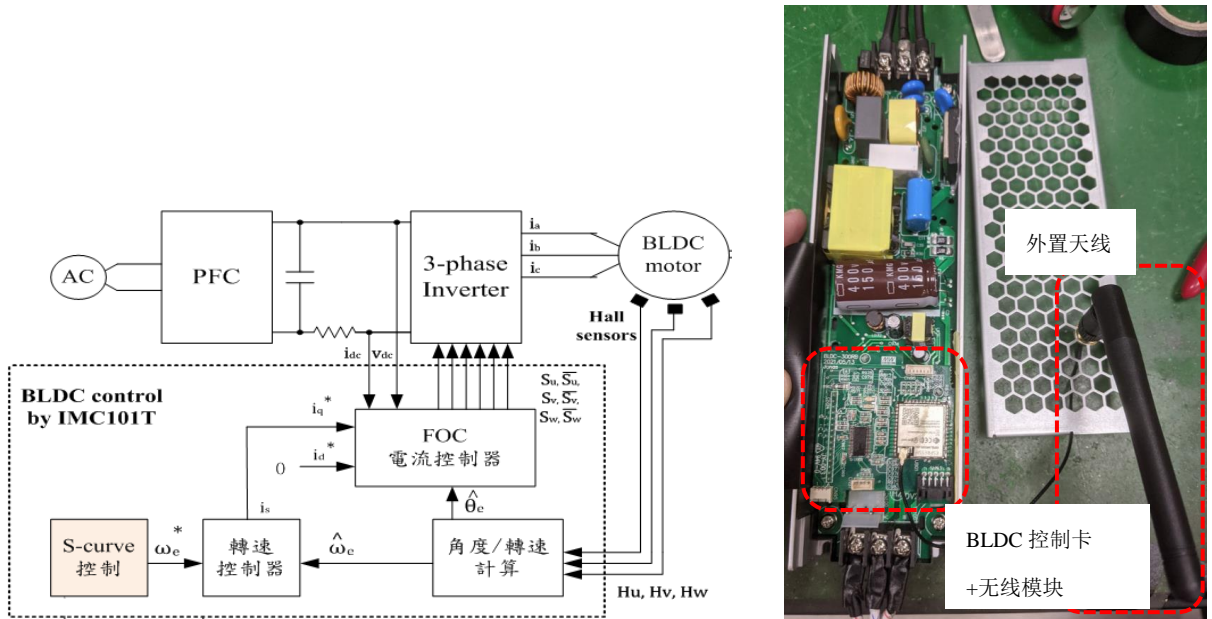


图 10 控制架构图与实体图

3.2.2 IMC-101T周边线路设计

以下说明 IMC-101T 控制周边线路设计:

线路图	说明
	<p>HV+回授线路:</p> $\text{Pin2} = \frac{8.25k}{665k+665k+8.25k} \times HV +$ $= 0.006165HV + (V)$ <p>RSH+回授线路:</p> $\text{Pin6} = R_{shunt} \frac{10k}{10k+2k} \times i_{HV}$ $= 83m \times i_{HV}(V)$ <p>PWM 控制线路: PWMUL~ PWMWL PWM 输出</p> <p>Hall sensor 回授线路: 上拉电阻 2k Ω, 接至马达 Hall sensor 线路 (open-collector)</p> <p>GK 保护线路: 接收主板 Gate</p>
<p>图 11 IMC-101T 控制器回授与保护线路</p>	

	<p>driver 保护线路，判断是否立即关闭 PWM</p>
<p>图 12 再生电阻控制线路</p>	<p>以 LM258ADT 设计 VDC 侦测线路，保护迟滞准位：</p> $OP+(H) = 5 \times \frac{4.99k}{(5.23k//140K)+4.99k} = 2.49V$ $OP+(L) = 5 \times \frac{(4.99k//140K)}{(4.99k//140K)+5.23k} = 2.4V$ $HV_{BRAKE}(H) = \frac{2.49}{0.006165} = 403V$ $HV_{BRAKE}(L) = \frac{2.4}{0.006165} = 389V$ <p>HV_{BRAKE}：高压端触发回升电阻启动准位</p>
<p>图 13 IMC 周边控制线路</p>	<p>SPD：转速控制脚位，接收无线模块 MCU 送出之控制电位</p> <p>RC：BLDC 启动/停止控制脚位，接收无线模块 MCU 送出之控制电位</p>

3.2.4 IMC-101T参数设计

IMC-101T 采用正弦波电流驱动与 FOC 控制, 位置回授在全转速下采用三相数字 Hall sensors 讯号回授 6 步讯号做 BLDC 的转子角度估测。

IMC-101T 主要搭配原厂软件 MCEWizard 设计其电机与驱动器参数, 并提供内建 script language, 主要用途为提供开发者可在程序背景设计简单的程序来设计控制功能。图 14 为马达参数马达使用 YELI-YBL-6S-148。图 15 为控制器参数, 其中可修改处为 58-Current Regulator Bandwidth, 64-Speed Regulator Proportional Gain, 65-Speed Regulator Integral Gain, 此三项参数会影响马达的电流波形, 经适当调整后可使电流趋近于正弦波。

Motor 1 Motor Parameters	
1 - Motor Model Name	YBL-6S-148
2 - Motor Rated Amps	1.2 Arms
3 - Motor Poles	8
4 - Motor Stator Resistance	3.49 Ohms/phase
5 - Motor Lq Inductance	10.7 mH
6 - Motor Ld Inductance	10.6 mH
7 - Motor Back EMF Constant (Ke)	19 V(n-rms)/krpm
8 - Motor Max RPM	800 RPM
9 - Minimum Running Speed	10 RPM
10 - Speed Ramp Rate	5000 RPM/sec

图 14 马达参数

Motor 1 Regulators	
58 - Current Regulator Bandwidth	1200 rad/sec
59 - Enable DC Bus Compensation	Enable
60 - Flux Estimator Time Constant	12 msec
61 - Speed Feedback Filter Time Constant	1 msec
64 - Speed Regulator Proportional Gain	100
65 - Speed Regulator Integral Gain	10

图 15 控制器参数

图 16 为 Hall-effect sensor 的角度修正参数, 此参数会影响马达回授位置的准确性, 参数根据反电势线电压 UV 与 Hall1 的相位差减 90 度, 设定为 60 度。

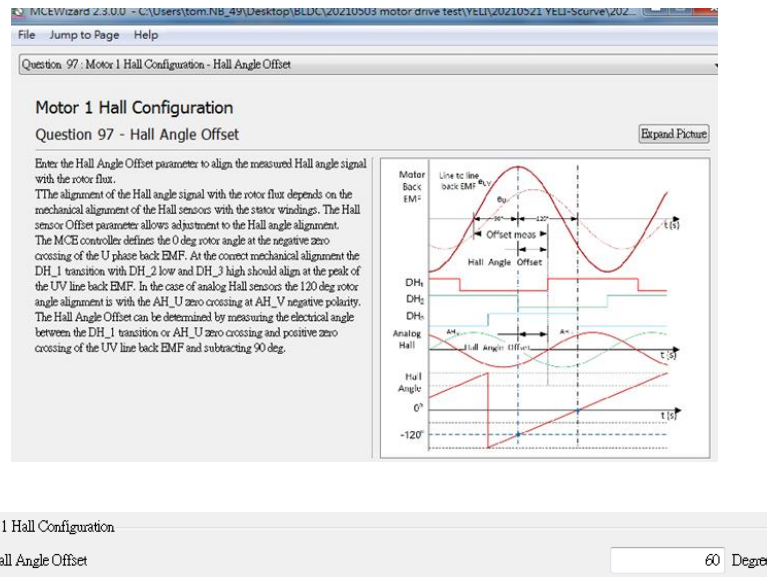


图 16 马达 Hall-effect sensor 角度修正定义

因使用 Hall-effect sensor 回授时，转速使用差分法计算马达转速(取 Hall 讯号变化时间)，较容易放大讯号误差，导致电流波型失真，转速计算需加入滤波器滤除高频量。转速滤波参数 *HallSpdFiltBW* 设定 1000，依以下公式(7)换算带宽约 36.7Hz。

$$BW = \frac{1}{2\pi \cdot T_{decay}} = \frac{Fast_Control_Rate}{F_{PWM} \cdot \ln\left(1 - \frac{HallSpdFiltBW}{2^{16}}\right)} = 36.7Hz \quad (11)$$

Fast_Control_Rate 为控制与切频比率; F_{PWM} 为 BLDC drive 切换频率; T_{decay} 为滤波时间常数。

3.2.5 S-curve控制

S-curve 缓启动主要功能为让本专题的卷帘机应用中，达到平滑的启动与停止的动作，改善启动/停止的机械应力而导致卷帘机的噪音与吊挂卷帘晃动的问题。S-curve 原理主要是将马达启动与停止加入”加速度”的缓启动”。由速度曲线来看则会如图 13 呈现 S 形曲线。S-curve 可搭配 script-function 于 IMC-101T 中建立方程式(8)(9)进行计算：

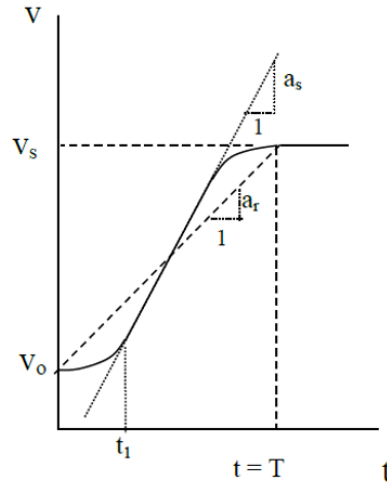


图 17 S-curve 加速曲线

$$ScurveLvL1 = \alpha * ScurveLvL1 + (1 - \alpha) * TargetSpeed \quad (12)$$

$$ScurveSpeed = \beta * ScurveSpeed + (1 - \beta) * ScurveLvL1 \quad (13)$$

由 ScurveSpeed 可得到平滑的输入转速曲线，调整 α 与 β 可调整 Scurve 的加速度缓启动，数值愈高则则加速度上升愈慢。马达实际 S-curve 加减速如下：

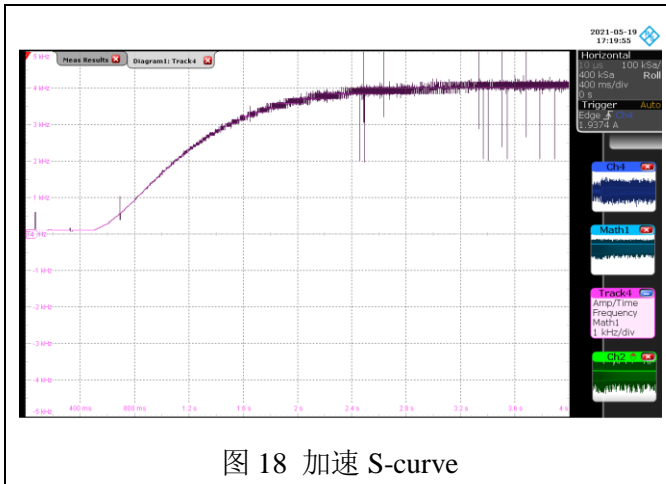


图 18 加速 S-curve

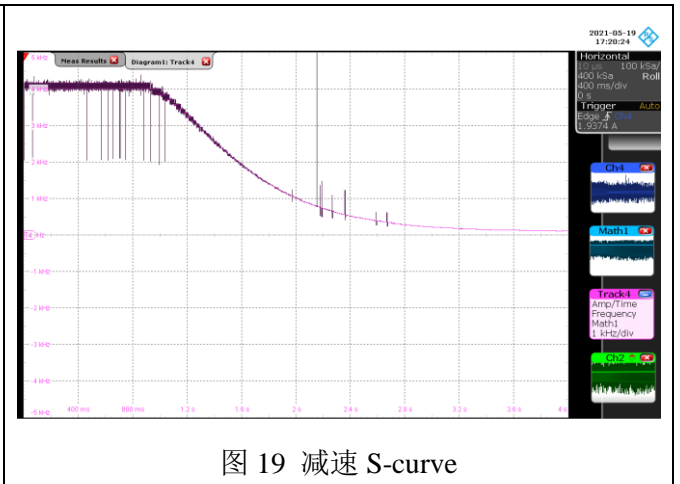


图 19 减速 S-curve

3.2.6 Script程序流程图

Script 中主要针对 BLDC 的相关外部功能(例如: 转速命令侦测/ Remote...)与保护功能进行功能的设计, 程序流程图如下:

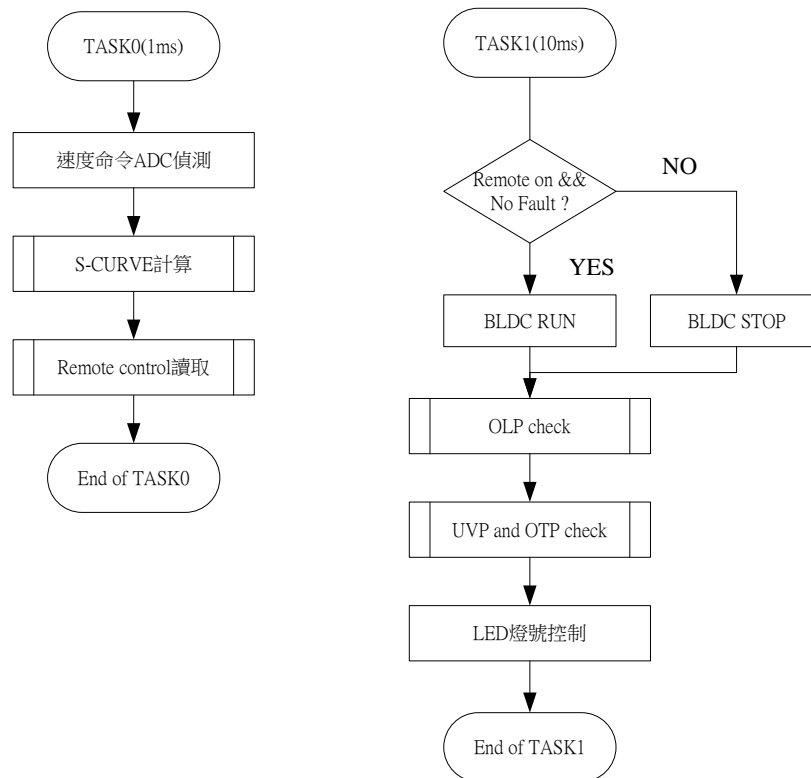


图 20 IMC-101T 周边功能程序流程图

3.3 无线功能设计

无线功能主要以 WIFI 通讯协议的方式进行卷帘机升降停的控制, 让用户在可以联机至网络的地方, 即可透过行动装置 APP 控制 BLDC 卷帘机, 达成一个可远程控制的卷帘机应用, 以下章节说明无线功能的设计。

3.3.1 无线模块系统架构

无线功能采用 Espressif Systems 的 ESP-WROOM-32U 无线模块，主要采用 WIFI 功能设计，协议采 IEEE 802.11 b/g/n，最高可支持 150Mbps 数据传输与 20dB 天线的输出功率。

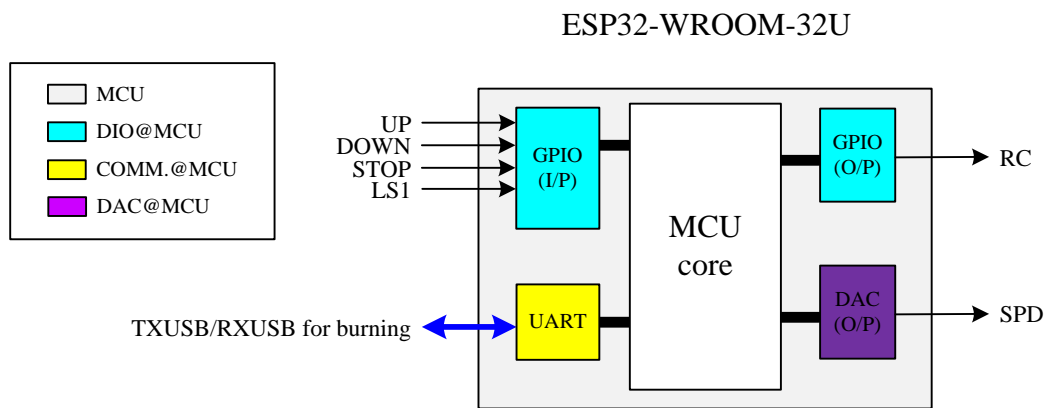


图 21 ESP32-WROOM-32U 架构图

除 WIFI 封包收发之外，无线模块可利用 Arduino IDE 开发外围 GPIO 与 DAC 功能，主要处理外部硬件讯号控制(上/下卷与停止，微动开关 LS1 接收)，与对 IMC-101T 模块设定输出转速 (SPD)与遥控功能(RC)。

无线功能主要用于卷帘系统之上卷/下卷/停机控制，应用上可搭配 APP 达到二台卷帘系统同步控制。APP 平台采用 Blynk 所提供的物联网平台设计。架构如下

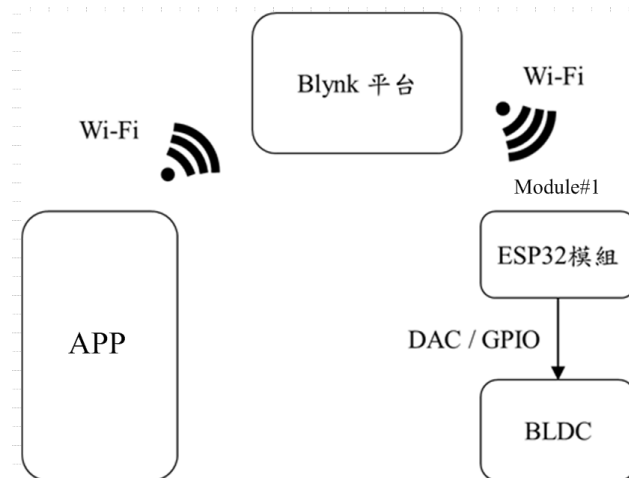


图 22 BLDC 无线控制架构图

其中各重点功能说明如下:

1. APP: 负责传送行动装置 APP 画面按钮信息至 Blynk 云端平台。
2. Blynk 平台: 负责处理 APP 和 ESP32 无线模块之间的控制链接。
3. ESP32 模块: 负责译码 APP 按钮点选信息, 译码后传送控制讯号给 BLDC。
4. BLDC: 马达驱动器

3.3.2 无线模块控制功能

当辅助电源+3.3V 建立后, 延迟 500ms 待 MCU 功能初始化完成后, 将 IN1_STAT 旗标 RESET 表示初始化完成。

在马达第一次启动前, RC 与 SPD 皆未建立。当外部启动控制讯号 EnableInput(来源:UP/DOWN by hardware or WiFi)接收到 low 信号且持续 20ms 以上, 进入卷帘系统启动程序。当侦测到 EnableInput 成立后, 系统致能旗标 SysEnable SET 表示卷帘准备运转。

SysEnable 致能后, 延迟 20ms 后 RC SET, SPD 转速 command 较 RC 提早 10ms 启动。当 DisableInput(来源:STOP/LS1 by hardware)收到持续 20ms 以上, 或是 WiFi 收到停止命令, SysEnable 旗标 RESET 表示系统停机, 同时 RESET RC 信号, 等待下次启动。

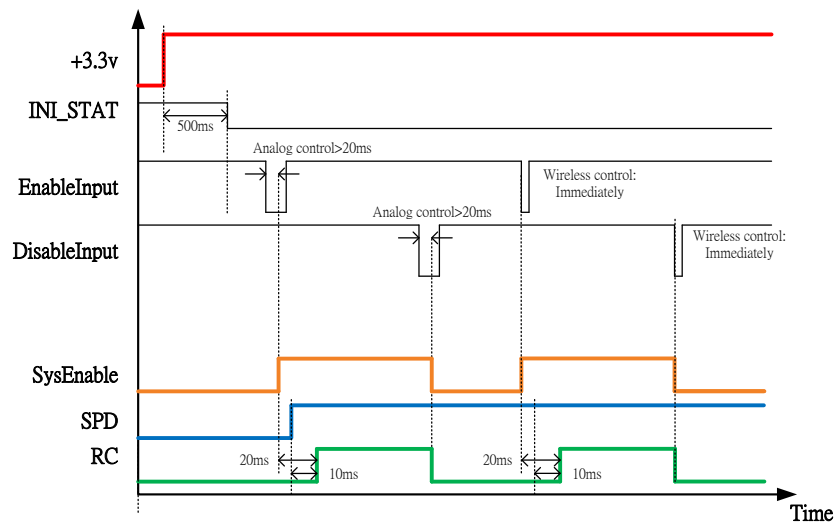


图 25 无线模块启动与控制时序

控制优先权主要三个控制动作同时发生时的优先权为: 1.停止; 2.上卷; 3.下卷。

上下卷动做交互切换下, 将会先 RESET RC 讯号 10ms, 修改 SPD 讯号为反方向运转后再 SET RC 讯号使 BLDC 启动。

上卷限制讯号 LS1 用于限制卷帘系统上极限, 卷帘机持续上卷至触碰到限制微动开关时, 微动开关讯号状态由 High 转 Low, 触发无线模块将 RC 输出关闭, 此时卷帘机禁止继续上卷, 达到卷帘定位的功能。

无线模块控制流程图如下:

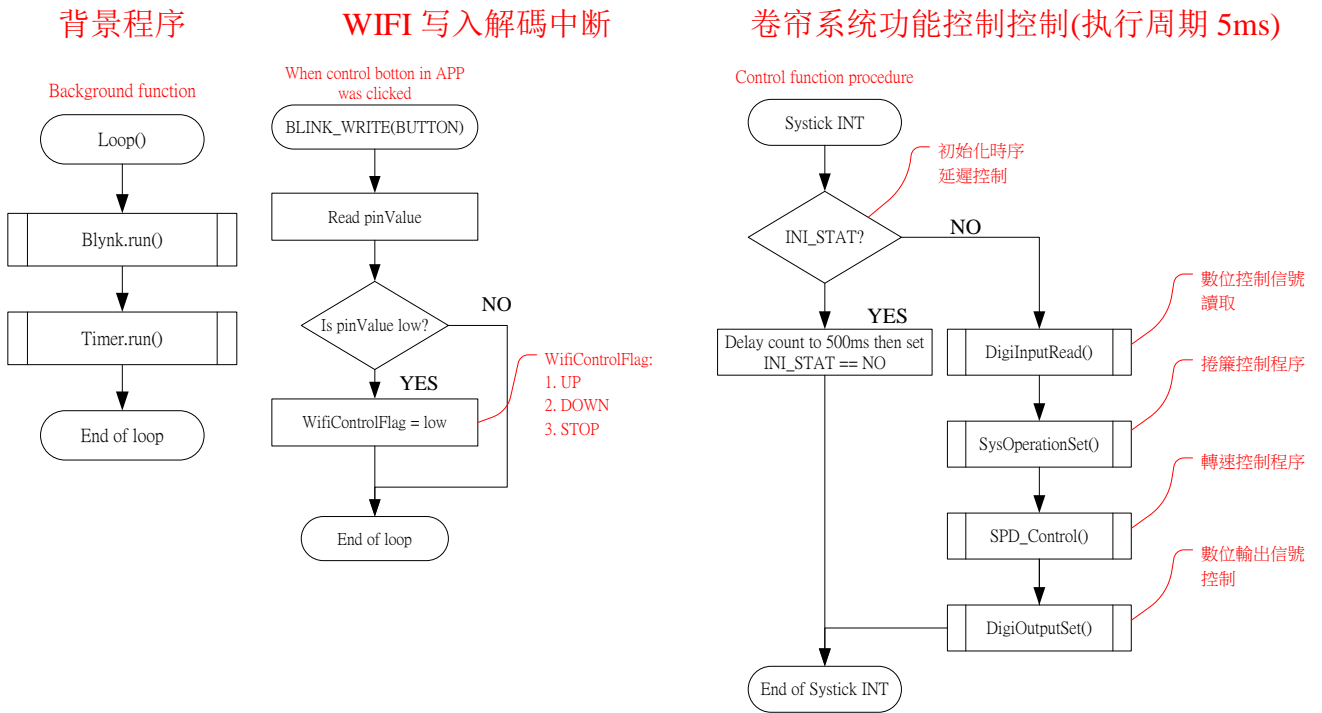


图 26 无线模块控制流程图

3.3.3 APP界面规划

APP 接口规划提供上/下卷与停机动作供用户发送控制讯息，接口如下。



图 27 APP 控制接口

四、系统性能评估

4.1 卷帘机实体成果

卷帘机实际应用情形如下图与影片所示，展示为公司大厅布幕吊挂的情形，实际布幕重量约 2kg，可顺利由公司一楼地面吊挂至二楼安装卷帘机处，并由触发微动开关的方式将卷帘机定位完成。

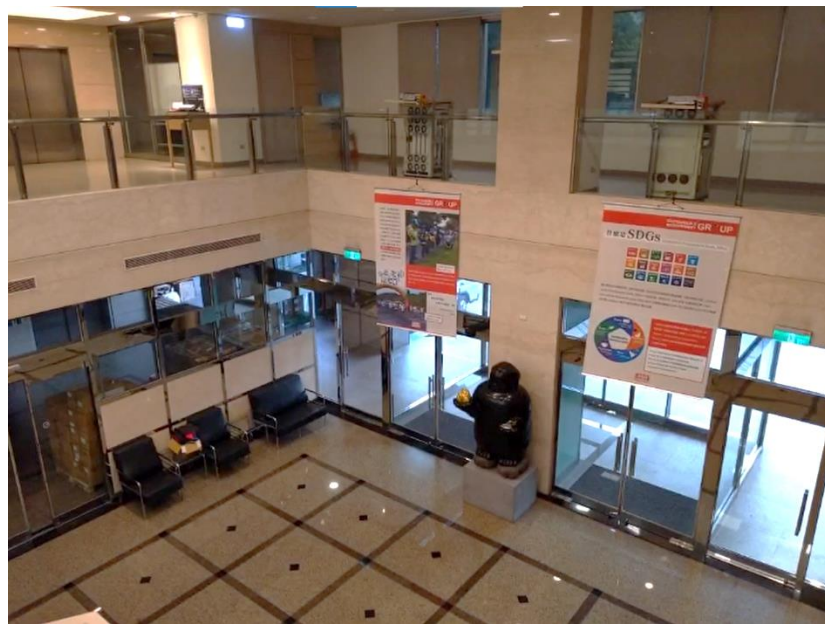


图 28 实际布幕搭配卷帘机

表 4 实际卷帘机动作影片与说明

影片连结	说明
影片连结	实际布幕由一楼地面同步吊挂至二楼情形。
影片连结	APP 连动 BLDC 卷帘控制器实际操作过程。

4.2 驱动器测试波形

以下说明本项目提出之卷帘机应用的稳态与动态测试，以评估其运转特性。除效率量测需上动力平台测试外，其余测试皆上卷帘机平台测试验证。效率测试使用之动力平台如下：

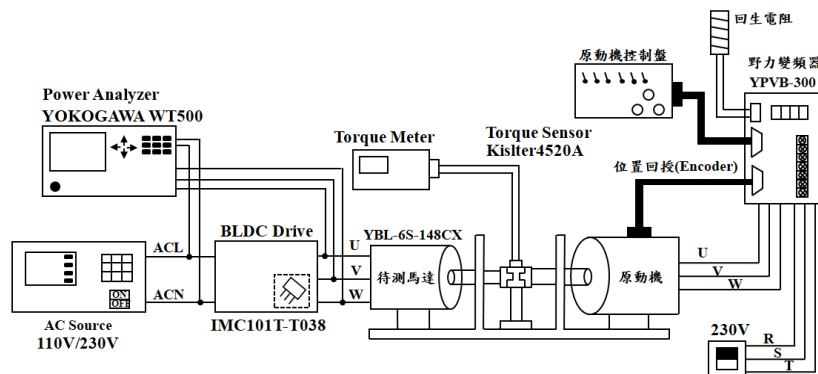
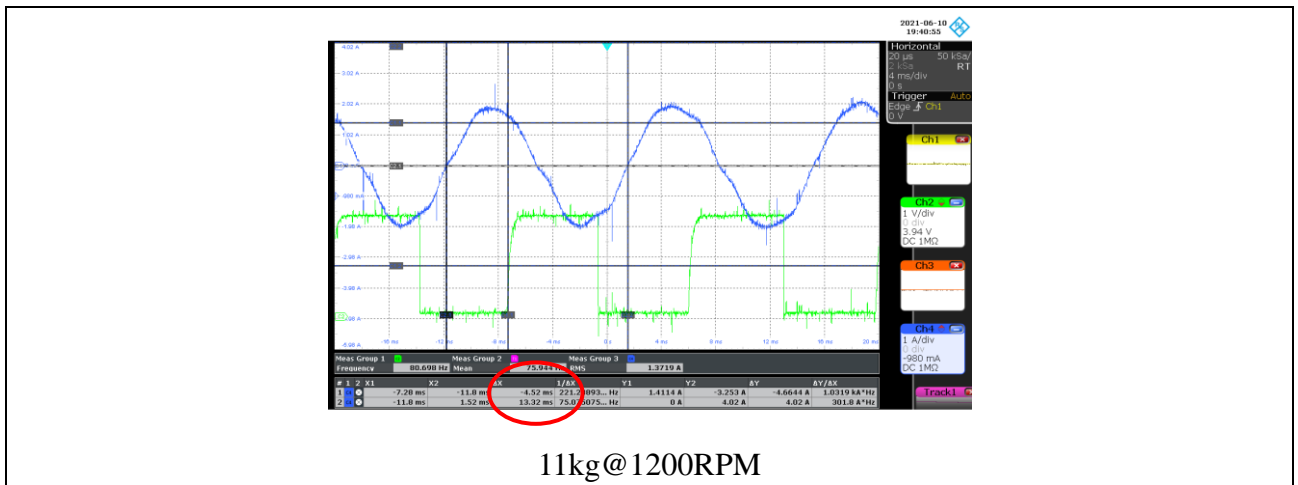


图 29 动力测试平台

4.2.1 相电流与电流相位

测试条件:	输入条件	输入电压 $V_{in} : 230Vac$
	输出条件	输出转速: 1200 RPM; 输出负载: 11kg load
测试方法:	以实作之卷帘机依测试条件，将条件的附载上卷至触动卷帘机的停机微动开关。并记录卷帘机拉动附载下的电流与 Hall-effect sensor 相位，确认电流相位与反电势同相位。	
测试结果	测试 u 相线电流 $I_u(\text{line})$ 超前 Hall1 角度 $= \frac{4.52}{13.32} \times 360^\circ = 122^\circ$ 对应测得反电势对应 Hall sensor 所述，线电压波形超前 Hall-effect sensor 约 150° ，而 Y 接绕组下三相线电压超前相电压 30° ，可知道相电压超前 Hall-effect sensor $= 150 - 30 = 120^\circ$ ，确认实际电流波形与相反电势同相，相位正确。	
波形		
CH1:- CH2:Hall1	CH3: - CH4: $I_u(\text{line})$	



4.2.2 效率

测试条件:	输入条件	输入电压 V_{in} : 230Vac	
	输出条件	(1)	输出转速: 4000 RPM 输出负载: 0.6 N-m
		(2)	输出转速: 800 RPM 输出负载: 0.6N-m
测试方法:	效率测试以动力平台评估, 依测试条件分别记录 Drive 效率与马达效率, 计算如下: $EFF_{(drive)} = \frac{P_{out(drive)}}{P_{in(drive)}}; \quad EFF_{(motor)} = \frac{P_{out(motor)}}{P_{out(drive)}}$ $P_{out(motor)} = \frac{2\pi \cdot N \cdot T}{60}; \quad N: \text{输出机械转速}; T: \text{输出机械转矩}$		
测试结果	$EFF_{(drive)} = 93.51\% @ 4000 \text{ RPM}; 74.62\% @ 800 \text{ RPM}$ $EFF_{(motor)} = 83.77\% @ 4000 \text{ RPM}; 80.21\% @ 800 \text{ RPM}$		
波形数据			
输入/输出功率@4000 RPM			
$P_{out(motor)} = (2\pi/60) * 4000 * 0.6 = 251W$ $P_{out(drive)} = 299.62W ; P_{in(drive)} = 320.4W$			
Element1: Pin(Driver) ; Σ : Pout(Driver)		Pout(Motor): 1 V: 1 N-m	

<p>Normal Mode Uover: ■■■ Scaling: ■ Linefilt: ■ NULL: ■ YOKOGAWA ◆ Iover: ■■■ Average: ■ Freqfilt: ■ CF: 3</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Element1</th> <th>Element2</th> <th>Element3</th> <th>Σ (3P3W)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Voltage 300v</td> <td>300v</td> <td>300v</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Current 5A</td> <td>2A</td> <td>2A</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Urms [V]</td> <td>230.34</td> <td>229.18</td> <td>228.34</td> </tr> <tr> <td>Irms [A]</td> <td>1.4916</td> <td>1.1995</td> <td>1.1064</td> </tr> <tr> <td>P [W]</td> <td>-0.3204k</td> <td>173.58</td> <td>126.04</td> </tr> <tr> <td>S [VA]</td> <td>0.3434k</td> <td>190.27</td> <td>186.78</td> </tr> <tr> <td>Q [var]</td> <td>0.1237k</td> <td>-77.88</td> <td>137.82</td> </tr> <tr> <td>λ []</td> <td>-0.9329</td> <td>0.9123</td> <td>0.6748</td> </tr> <tr> <td>φ [°]</td> <td>6158.89</td> <td>D24.18</td> <td>647.56</td> </tr> <tr> <td>fU [Hz]</td> <td>60.000</td> <td>266.83</td> <td>266.83</td> </tr> <tr> <td>fI [Hz]</td> <td>60.004</td> <td>266.77</td> <td>266.79</td> </tr> </tbody> </table> <p>Efficiency: η1 -93.527 [%], η2 237.723 [%]</p> <p>Delta Measure: Δf1rms [μs] 229.38 [V], Δf2rms [μs] 1.20 [A], Δf3rms [μs] [], Δf4rms [μs] []</p> <p>Integ:Reset Time []</p> <p>Update 753(100msec) 2021/05/17 18:33:33</p>	Element1	Element2	Element3	Σ (3P3W)	Voltage 300v	300v	300v		Current 5A	2A	2A		Urms [V]	230.34	229.18	228.34	Irms [A]	1.4916	1.1995	1.1064	P [W]	-0.3204k	173.58	126.04	S [VA]	0.3434k	190.27	186.78	Q [var]	0.1237k	-77.88	137.82	λ []	-0.9329	0.9123	0.6748	φ [°]	6158.89	D24.18	647.56	fU [Hz]	60.000	266.83	266.83	fI [Hz]	60.004	266.77	266.79	
Element1	Element2	Element3	Σ (3P3W)																																														
Voltage 300v	300v	300v																																															
Current 5A	2A	2A																																															
Urms [V]	230.34	229.18	228.34																																														
Irms [A]	1.4916	1.1995	1.1064																																														
P [W]	-0.3204k	173.58	126.04																																														
S [VA]	0.3434k	190.27	186.78																																														
Q [var]	0.1237k	-77.88	137.82																																														
λ []	-0.9329	0.9123	0.6748																																														
φ [°]	6158.89	D24.18	647.56																																														
fU [Hz]	60.000	266.83	266.83																																														
fI [Hz]	60.004	266.77	266.79																																														

输入/输出功率@800 RPM

$$P_{out(motor)} = (2\pi/60) * 800 * 0.643 = 53.87W$$

$$P_{out(drive)} = 72.19W ; P_{in(drive)} = 90W$$

<p>Normal Mode Uover: ■■■ Scaling: ■ Linefilt: ■ NULL: ■ YOKOGAWA ◆ Iover: ■■■ Average: ■ Freqfilt: ■ CF: 3</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Element1</th> <th>Element2</th> <th>Element3</th> <th>Σ (3P3W)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Voltage 300v</td> <td>300v</td> <td>300v</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Current 5A</td> <td>2A</td> <td>2A</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Urms [V]</td> <td>230.80</td> <td>115.71</td> <td>115.78</td> </tr> <tr> <td>Irms [A]</td> <td>0.5420</td> <td>1.1748</td> <td>1.1705</td> </tr> <tr> <td>P [W]</td> <td>-0.0900k</td> <td>40.22</td> <td>31.96</td> </tr> <tr> <td>S [VA]</td> <td>0.1251k</td> <td>51.59</td> <td>51.42</td> </tr> <tr> <td>Q [var]</td> <td>-0.0869k</td> <td>-32.30</td> <td>40.27</td> </tr> <tr> <td>λ []</td> <td>-0.7192</td> <td>0.7797</td> <td>0.6216</td> </tr> <tr> <td>φ [°]</td> <td>0135.99</td> <td>D38.77</td> <td>651.56</td> </tr> <tr> <td>fU [Hz]</td> <td>60.004</td> <td>53.170</td> <td>53.107</td> </tr> <tr> <td>fI [Hz]</td> <td>272.04</td> <td>53.233</td> <td>53.112</td> </tr> </tbody> </table> <p>Efficiency: η1 -80.251 [%], η2 225.838 [%]</p> <p>Delta Measure: Δf1rms [μs] 115.66 [V], Δf2rms [μs] 1.16 [A], Δf3rms [μs] [], Δf4rms [μs] []</p> <p>Integ:Reset Time []</p> <p>Update 1548(100msec) 2021/05/17 18:36:53</p>	Element1	Element2	Element3	Σ (3P3W)	Voltage 300v	300v	300v		Current 5A	2A	2A		Urms [V]	230.80	115.71	115.78	Irms [A]	0.5420	1.1748	1.1705	P [W]	-0.0900k	40.22	31.96	S [VA]	0.1251k	51.59	51.42	Q [var]	-0.0869k	-32.30	40.27	λ []	-0.7192	0.7797	0.6216	φ [°]	0135.99	D38.77	651.56	fU [Hz]	60.004	53.170	53.107	fI [Hz]	272.04	53.233	53.112	<p>Pout(Motor) : 1 V: 1 N-m</p>
Element1	Element2	Element3	Σ (3P3W)																																														
Voltage 300v	300v	300v																																															
Current 5A	2A	2A																																															
Urms [V]	230.80	115.71	115.78																																														
Irms [A]	0.5420	1.1748	1.1705																																														
P [W]	-0.0900k	40.22	31.96																																														
S [VA]	0.1251k	51.59	51.42																																														
Q [var]	-0.0869k	-32.30	40.27																																														
λ []	-0.7192	0.7797	0.6216																																														
φ [°]	0135.99	D38.77	651.56																																														
fU [Hz]	60.004	53.170	53.107																																														
fI [Hz]	272.04	53.233	53.112																																														

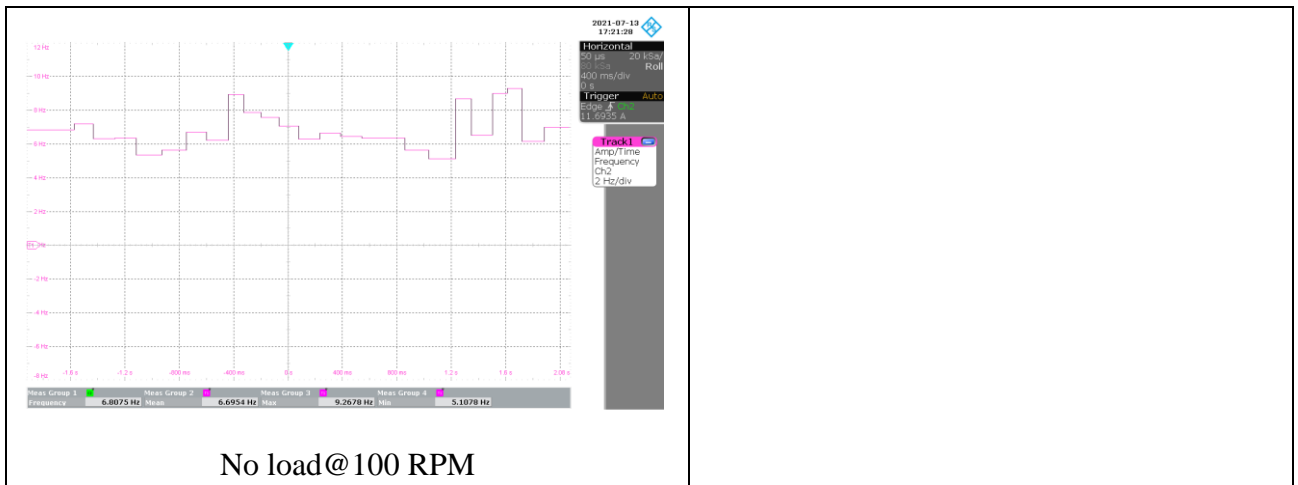
4.2.3 加/减速时间

测试条件:	输入条件	输入电压 Vin : 230Vac
	输出条件	输出转速: 1200 RPM 输出负载 : No load
测试方法:	加速时间: 以实作之卷帘机依测试条件, 将条件的附载上卷至转速设定, 记录卷帘机马达启动至达到目标转速的上升时间(rising time), 作为卷帘机的加速时间。	

	减速时间: 将条件的附载上卷至转速设定, 达设定转速后按下卷, 记录卷帘机马达从额定转速至零速的下降时间(falling time), 作为卷帘机的减速时间。		
测试结果	加速时间: 1.152 sec 减速时间: 0.424 sec		
波形			
CH1:- CH2:-	CH3: - Track1: Freq.(Hall1)	CH1:- CH2:-	CH3: - Track1: Freq.(Hall1)
<p style="text-align: center;">No load@0→1200RPM</p>		<p style="text-align: center;">No load@1200→0 RPM</p>	

4.2.4 最低转速控制

测试条件:	输入条件	输入电压 Vin : 230Vac	
	输出条件	输出转速: 依测试结果 输出负载: No load	
测试方法:	以实作之卷帘机依测试条件, 将条件的附载上卷至触动卷帘机的停机微动开关, 并降低转速设定, 记录可稳定运转之转速当作最低转速点。并记录转速涟波峰对峰值。		
测试结果	最低转速: $6.7 * 60 / 4 = 100.5 \text{ RPM@no load}$, Speed ripple(p-p) = $(9.3 - 5.1) * 60 / 4 = 63 \text{ RPM}$		
波形			
CH1:- CH2:-	CH3: - Track1: Freq.(Hall1)		



4.3 控制卡线路图与零件表

BLDC-300R 套件主要修改部分为控制卡，加入无线通信模块与天线，以及微动开关与 Hall-effect sensor 转换线路等部分，主要组件成本如下表 5，线路图如图 30、31。

表 5 主要部件成本

Part#	Specification	Q't	Cost(NTD)	Note
1	MSD3 PWM(Motor) IMC101T-T038 SOP-38	1	23	BLDC 控制 IC
2	OP LM258ADT	1	2	回生电阻控制
3	ESP-WROOM-32U	1	123	WIFI 无线模块
4	OP TS321A SOT23-5	1	3	转速控制信号转换线路
5	2.4G 天线+IPEX 转 SMA 线材	1	50	WIFI 天线
6	小型 3P 微动开关 5A/125V	1	12	上卷极限限制开关
总成本			213	

