

小型風力發電機現地試驗方法建立 與風洞試驗比較研究

內政部建築研究所自行研究報告

中華民國 98 年 12 月

小型風力發電機現地試驗方法建立
與風洞試驗比較研究
(成 果 報 告)

研究主持人：劉文欽

內政部建築研究所自行研究報告

中華民國 98 年 12 月

目次

目次	I
表次	III
圖次	IV
符號表	I
摘要	I
第一章 緒論	1
第一節 研究緣起與背景	1
第二章 文獻回顧	3
第一節 綠色能源發展現況	3
第二節 風力發電機性能	10
第三章 風力機實場量測平台	15
第四章 現場量測方法及風洞實驗結果	23
第二節 風洞實驗的結果	24
第五章 試驗架設及量測結果	28
第一節 量測平台硬體架設過程	28
第二節 風力機量測結果	30
第六章 結論與建議	41
第一節 結論	41
第二節 建議	41
參考書目	43

小型風力發電機現地試驗方法建立
與風洞試驗比較研究

表次

表 2-1 全球再生能源發電量預測.....	5
表 2-2 蒲福風級表.....	9
表 3-1 本研究風力發電機規格.....	17
表 3-2 GILL 公司風速計性能特性.....	20
表 5-1 風洞測試與實場量測結果比較表.....	39

圖次

圖 2-1 全球風力機累積裝載容量	4
圖 2-2 風力發電機種類示意圖	7
圖 2-3 自然風場頻譜圖	8
圖 2-4 單流管模型	11
圖 2-5 各式不同種類風力發電機之發電效能性能曲線	12
圖 2-6 風力機的作動原理	13
圖 3-1 風洞館頂樓周圍環境現況	15
圖 3-2 風速計及小型風力發電機現場架設圖	16
圖 3-3 風力發電機及風速計實場配置圖	17
圖 3-4 PRODIGIT 公司 3350 高功率電子負載	19
圖 3-5 轉速計	20
圖 3-6 交直流轉換暨煞車系統	21
圖 3-7 VB 資料擷取程式	22
圖 4-1 內政部建築研究所風洞實驗室外觀	23
圖 4-2 風力機無負載狀況下轉速與風速的關係圖	25
圖 4-3 風力機無負載狀況下輸出電壓與風速的關係圖	25
圖 4-4 DS-200 風力機性能曲線圖	26

圖 4-5 DS-200 風力機發電效能係數曲線圖	27
圖 5-1 風力發電機實場量測平台架設過程	28
圖 5-2 資料擷取程式執行畫面	29
圖 5-3 風洞館頂樓 7 月 18 日風速資料	30
圖 5-4 風洞館頂樓 7 月 19 日風速資料	31
圖 5-5 風力發電機 7 月 18 日發電效能與風速關係	32
圖 5-6 風力發電機 7 月 18 日發電效能與轉速關係	32
圖 5-7 風力發電機 7 月 19 日發電效能與風速關係	33
圖 5-8 風力發電機 7 月 19 日發電效能與轉速關係	33
圖 5-9 11 月下旬高風速時所測得風速與風向角資料	34
圖 5-10 11 月下旬高風速時所測得風速與發電效率資料	35
圖 5-11 11 月下旬高風速時所測得風速與輸出電壓資料	36
圖 5-12 不同風速下風力機輸出發電效能係數關係圖	37
圖 5-13 不同風速下風力機輸出發電效能變異係數關係圖	37
圖 5-14 風力機發電效能於實場量測與風洞實驗之比較	38

符號表

R	:	電阻
I	:	結構特徵長度
Volt	:	電壓
RPM	:	轉速
W	:	發電效能
V	:	環境風場風速
λ	:	尖端速率比

摘要

關鍵詞：風力發電機、性能曲線、測試平台

一、研究緣起

本 2007 年行政院產業科技發展策略會議將風力發電列為策略性新能源產業項目之一，政府能源政策白皮書則規劃逐年提升風機裝置容量，2010 年將達 215.9 MW。因此，發展風機產業一方面可減少化石燃料的依賴，另一方面則能夠減少溫室氣體的排放量，達到溫室氣體減量及環境永續發展的目的。目前台灣風力發電產業如雨後春筍般的發展，已有多家廠商投入微小型風力發電機的開發與生產，且都有不錯的成果及經濟效益，但目前微小型風力發電機尚無國際標準及規範來限制，所以其產品的效能、使用安全及使用範圍等都無公認之遵循依據，這也突顯了現今市場上風力發電機的許多問題。

有鑑於此本研究將針對微小型風力發電機建立一個實場量測平台與進行實際測試，並比較在實際狀況下風力所表現的性能與風洞試驗所表現的性能差異性。

二、研究方法

本研究之工作包括測試風力機平台建立、風力機長時間實場量測及風力機實場量測與風洞試驗性能比較等 3 階段：

- a 地點選定
- b 測試平台建制
- c 系統長時間穩定度的量測
- d 進行量測及資料分析
- e 與風洞實驗結果比較

三、結論

本研究的風力發電機實場量測平台已經建置，也已經量測風力機發電效能，並經由長時間統計，目前有以下的結論：

小型風力發電機現地試驗方法建立 與風洞試驗比較研究

- a 風力起始風速在自然風場下約為 1.5~2m/s，此結果較風洞結果為低。
- b 風力機在風洞均勻流場的狀況底下，因為來流風速可以穩定且持續，因此可能可以得到較高發電效能。在實場狀況下，風速無法持續維持一固定風速得到發電效能會較小，以目前實場量測得到最大風速 12m/s，發電機發電發電效能與風洞試驗相差超過 10 瓦。
- c 風力機負載不同電阻會影響風力機轉速，相同風速下持續抽電會造成風力機發電效能降低。
- d 風力機目前實場量測在高風速下數據（超過 10m/s）以上資料相對較少，在 12m/s 時變異係數超過 25%。

四、建議事項

短程建議

- a 持續進行風力機性能監測，累積較多風力機發電效率數據，根據 IEC-61400 規範中規定實場量測需要有 180 天以上的量測數據。
- b 找出不同風速下最佳負載電阻，得以測得風力機最大發電效率。
- C 目前測試平台因為電腦系統有時會不穩定，可針對電腦設定微調，並持續監測檢測穩定度。

中、長程建議

- a 評估資料擷取系統中每一項設備的誤差，得以計算出該項測試的總體誤差，以作為申請 TAF 認證過程所需資料。
- b 建立一個穩定的檢測平台。國內產業對小型風力機發展的是相當快速，所以需要一個機構對廠商的風力機性能去做一檢驗，所以本研究希望建立一個穩定的測試平台。
- c 風場資料可以長時間累積，並且將長時間累積的風場資料與氣象局在歸仁附近地區的觀測站結果比較，風場資料可以提供日後風力機測試參考資料。

Abstract

Keyword: Wind Power Generator, Performance Curve, Test Platform

I. Introduction

In 2007, The Executive Yuan held a Strategic Review Board (SRB) meeting, which included the wind power as one of the strategic new energy. The development of wind energy not only can decrease the dependence on the fossil energy, but also can reduce the emission of greenhouse gas. Recently in Taiwan, more companies are devoted in developing and manufacturing the micro size wind power generators. However, without the explicit international standards or regulations, the liability and usability of the generators are uncertain.

Based on the above reason, in this research, an on-site test platform for a wind power generator is established. The test results are thereafter compared with the data derived from the wind tunnel test to verify its credibility.

II. Research Methods

In this research, three stages of works are carried out, which included:

- a. the setup of the testing platform;
- b. long time measurement of a wind power generator;
- c. comparison of the performance curves between the on-site test and the wind tunnel test.

III. Conclusions

With the establishment of the on-site testing platform of the wind power generator, a long duration of testing data was statically analyzed and was compared to that derived from the wind tunnel test which was carried out last year. Some conclusions are found as follow:

- a. The starting wind speed in the nature wind environment is about 1.5 ~2m/s, which is lower than that in the wind tunnel.

小型風力發電機現地試驗方法建立 與風洞試驗比較研究

- b: Under the uniform wind flow, because the incoming wind speed is steady, therefore, a more efficient power generating rate is achieved. However, in the real environment, because the wind speed is unsteady, thus, the efficient rate is lower. For the wind speed to be 12m/s, the power generating rate on site is 10 watt lower than in the wind tunnel.
- c: Different loadings of the electric resistant on the wind machines will affect the rotation speed. Besides, under a wind field of a constant speed, continuing generating electricity will decreased the performance of the wind machine.
- d. The on-site test data acquired under the high wind speed (over 10m/s) is relatively fewer, therefore, for the performance curve of the wind machine, the coefficient of variation in 12m/s is over 25%

VI. Suggestions

A. Short term suggestions:

- a. According to the regulation of IEC-61400, the duration of the on-site test should be at least 180 days. Therefore, the monitoring of this test should be continued to acquiring sufficient data.
- b. To find out the best electricity generating efficiency, the electric resistant loadings for different wind speeds should be first discovered.
- c. The computer system of the testing platform should be well tuned to increase the long time testing stability.

B. Mid-term and long-term suggestions:

- a. For applying the TAF certification, the uncertainty (error) of every equipment on the testing platform should be estimated, and the overall uncertainty of the system should also be calculated.
- b. Because the development of the micro-sized wind power generators in Taiwan is very rapid, thus a steady and reliable testing platform is urgently needed.

Therefore, a TAF certified testing platform should be established.

- d. With long time data acquisition, sufficient information along with the data from the Central Weather Bureau can be provided as a reference for the future testing of the wind power generators.

第一章 緒 論

第一節 研究緣起與背景

壹、研究緣起

本研究的旨在於建立小型風力發電機實場量測平台並進行實際測試，並比較在實際狀況下風力所表現的性能與風洞試驗所表現的性能差異性。2007 年行政院產業科技發展策略會議將風力發電列為策略性新能源產業項目之一，政府能源政策白皮書則規劃逐年提升風機裝置容量，2010 年將達 215.9 MW。因此，發展風機產業一方面可減少化石燃料的依賴，另一方面則能夠減少溫室氣體的排放量，達到溫室氣體減量及環境永續發展的目的。

目前台灣風力發電產業如雨後春筍般的發展，已有多家廠商投入微小型風力發電機的開發與生產，且都有不錯的成果及經濟效益，但目前微小型風力發電機尚無國際標準及規範來限制，所以其產品的效能、使用安全及使用範圍等都無公認之遵循依據，這也突顯了現今市場上風力發電機的許多問題，有鑑於此本研究將針對微小型風力發電機建立一個實場量測平台。

貳、研究目的

本研究之目標有如下四項：

1. 建立小型風力機實場量測平台
2. 測試長時間量測平台的系統穩定性。
3. 建立風洞館頂樓長時間風速資料。
4. 比較小型風力機在風洞與實場量測時性能表現差異。

參、研究方法

本研究之工作包括測試風力機平台建立、風力機長時間實場量測及風力機實場量測與風洞試驗性能比較等 3 階段，茲將各階段內容分述如後：

小型風力發電機現地試驗方法建立 與風洞試驗比較研究

a. 地點選定：

本研究實場量測平台設置地點選擇在歸仁風洞館頂樓，該處位於郊區，鄰近區域沒有較高建築物干擾風場較為穩定，適合長時間做風力機量測。

b. 測試平台建制

本研究將使用 PRODIGIT 公司所生產的 3350 系列高功率電子負載系統，搭配 GILL 公司所生產的風速計及自製的交直流轉換電路系統，利用 VB 撰寫資料擷取系統及控制程式。

c. 系統長時間穩定度的量測

本研究的實場量測平台需要長時間量測風力機，因此系統的穩定度是很重要的，所以本系統需要長時間監測系統。

研究步驟

1. 風力機實場量測平台建制

- ①量測儀器整合及平台建制。
- ②風力機性能檢測。
- ③風洞館頂樓風場量測。

2. 風力機資料庫統計建立

風力機性能與環境風場進行長時間量測及資料比對。

3. 實場與風洞資料進行比對

針對性能曲線及起始風速等項目進行實場量測及風洞資料比對。

第二章 文獻回顧

第一節 綠色能源發展現況

據國際能源署(IEA, International Energy Agency)「2007 年世界能源展望(WEO 2007, World Energy Outlook 2007)」預測資料顯示：全球發電量將由 2005 年的 18.2 兆度增加至 2015 年的 25.6 兆度，年成長率為 3.5%；其中，再生能源發電量將由 2005 年的 3.32 兆度增加至 2015 年的 4.89 兆度，年成長率為 3.9%。由再生能源發電量成長率 3.9% 超過全球總發電量成長率 3.5% 可得知，再生能源發電在發電部門日益占有一席之地。其中，風力發電由於技術純熟且受世界各國普遍立法獎勵推廣下，業成為次於水力發電之主要再生能源風能是大自然賜予的免費資源，取之不盡用之不竭，近一、二十年來能源危機逐漸突顯，風力能源又再度受到重視，世界各先進國家無不積極進行風能的相關研究與利用，因科技與技術持續的進步，現代的風力發電機無論是在性能、設計、建造或發電效益上都有長足的發展(如圖 2-1 所示)。台灣為一海島，石化天然資源貧乏，但由於位在東北信風帶(Northeast Trade Winds)上，風力資源相當豐富，近來因油價高漲及再生能源意識的興起，如何可有效利用此豐富的再生能源，實為現今迫切重要的課題。目前已有許多國家大量應用風力發電裝置，依據張希良其著作 (2007) 和全球風能協會(Global wind energy council)之 2006 年的報告，風力發電機裝機量高達 20000MW，此發展主要是由中國、美國及西班牙來領導，使得比起 2006 年的市場增加了約 31% 的容量。目前前五位裝機容量最高的國家排序為德國、美國、西班牙、印度、中國，如將其裝設的容量轉換成經濟效益則可高達 2.5 億歐元或 3.7 億美元，這是個可觀的數字。美國在 2007 年的記錄裝設了約 5244MW 的容量為 2006 年的兩倍，美國將在 2009 年趕上德國成為世界風力能源的領導者。中國在 2007 裝設了 3304MW 的風力發電容量，在市場上比起 2006 年增加了 145%，歐洲各國風能裝設的成長不斷的變化，特別是西班牙，歐洲在 2006 年裝設了 8662MW 的容量，而 2007 年總裝機容量為 57135MW 的容量，其一年可減少排放九千萬噸的二氧化碳，並可一年平均風能可增加約 119TWh 的能源。西班牙的風力發電市場也十分的令人驚豔，2007 年其新裝設容量為全歐洲最大的。此份報告指出 2007 年風力發電機的主要裝設已不在歐洲的範圍內，南美、亞洲，均可以持續看到重要的成長。除此之外中國自行生產風力發電機的能力也逐漸提升，再 2006 年約 400MW 的新裝設容量是由中國本身來製造的，代表亞洲的風力製造工業正在起步。

小型風力發電機現地試驗方法建立
與風洞試驗比較研究

GLOBAL CUMULATIVE INSTALLED CAPACITY 1996-2008

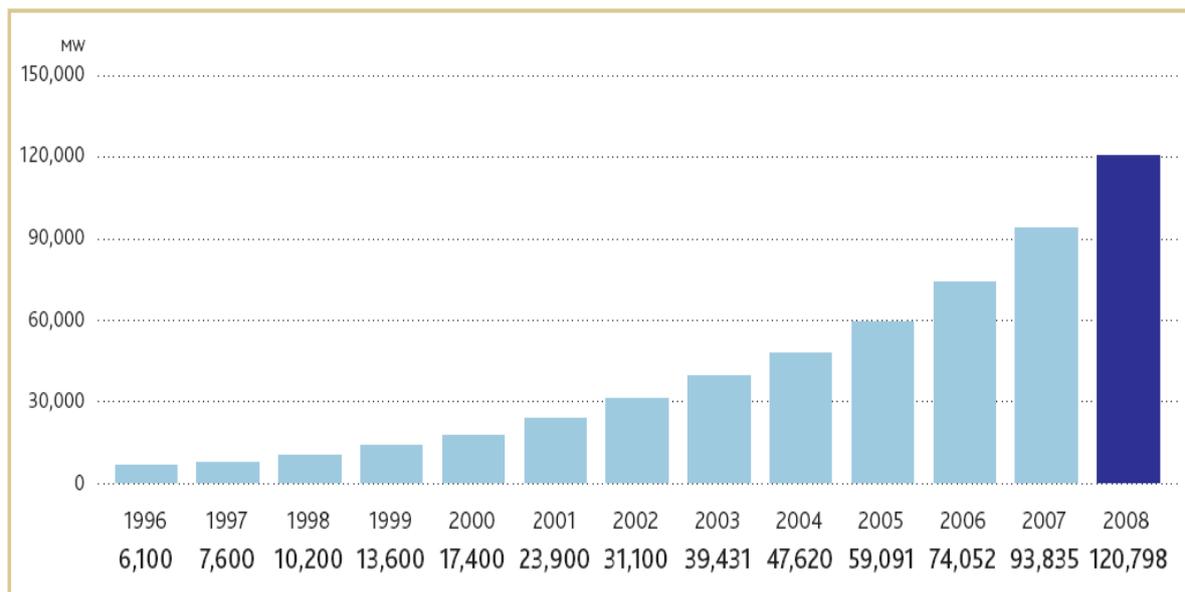


圖2-1 全球風力機累積裝載容量

資料來源：全球風能協會網站

表2-1 全球再生能源發電量預測

	1990	2005	2015	2030	2005-2015 年成長率	2005-2030 年成長率
總發電量	11,802	18,197	25,556	35,384	3.5	2.7
非再生能源	9,491	14,876	20,664	28,068	3.3	2.6
-煤	4,429	7,334	11,081	15,796	4.2	3.1
-石油	1,324	1,186	1,166	929	-0.2	-1.0
-天然氣	1,725	3,585	5,334	8,068	4.1	3.3
-核能	2,013	2,771	3,083	3,275	1.1	0.7
再生能源	2,311	3,321	4,892	7,315	3.9	3.2
-水力	2,145	2,922	3,799	4,842	2.7	2.0
-生質能	1,24	231	407	840	5.8	5.3
-風力	4	111	549	1,287	17.3	10.3
-地熱能	36	52	99	173	6.7	4.9
-太陽能	1	3	37	161	27.4	16.9
-海洋能	1	1	1	12	9.9	12.8

資料來源：IEA, World Energy Outlook 2007

國內電機、機械產業的製造技術對我國風力發電產業的發展奠定非常良好的基礎，包括工研院機械所、核能研究所及金屬工業發展中心已從事相關組件的研發，亦獲得初步的研究成果。2007年行政院產業科技發展策略會議將風力發電列為策略性新能源產業項目之一，政府能源政策白皮書則規劃逐年提升風機裝置容量，2010年將達215.9 MW。因此，發展風機產業一方面可減少化石燃料的依賴，另一方面則能夠減少溫室氣體的排放量，達到溫室氣體減量及環境永續發展的目的。

貳、目前國際風力機認證規範發展現況

風力發電機組之設計，必須要確保其能以性能良好且安全的方式運作，有關風力發電的設計標準的發展，在近年中已有相當的發展，相關的國際標準已經發展並公告，以符合最低的安全要求。

風力發電渦輪機的國際標準主要是由國際電工協會(International Electrotechnical Commission, IEC)第 88 號技術委員會(TC-88)負責制定，主要的標準如下：

- IEC 61400-1 風力機的安全與設計
- IEC 61400-2 小型風力機測試
- IEC 61400-11 噪音測試
- IEC 61400-12 風力機性能曲線測試
- IEC 61400-13 機械負載測試
- IEC 61400-21 發電效能品質評估
- IEC 61400-22 風力機性能認證
- IEC 61400-23 風力機葉片性能檢測
- IEC 61400-24 Lightning Protection

IEC、IEEE 及 AWEA 仍在發展許多新的風力發電標準，而美國國家再生能源實驗室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)，已針對上述標準制定許多實用性的指引，提供產業界使用。這些標準能夠有效運作的關鍵，在於能否提供足夠的消費者與安全保護，以避免產生市場與經濟上的障礙。目前在歐洲與美國已建立了許多驗證制度，如在美國 NREL 已與 Underwriters Laboratories (UL) 建立風力發電驗證制度，而 IEC 的標準亦在此驗證制度中被引用。

參、風力發電發電機的分類

目前市面上風力發電機種類種類甚多，若是依轉輪形式來區分，由風向與轉軸的方向關係看，大體上可以分為水平軸與垂直軸兩種發電機。

Walker(1997)分別對水平式風力發電機(HAWT)與垂直式風力發電機(VAWT)優缺點的研究可總結如下：

垂直式風力發電機：垂直式發電機之軸承垂直於風向，主要採用升力型之葉片，因為垂直型風機不易控制葉片的擷風面，因此無法在風速過高的情況下停機，易導致發電機的軸承在強風時轉速過快而損毀。但是垂直風機因為具有構造簡單、無方向性及低噪音之優點，因此在一些受到噪音管制及掃風範圍限制的地方仍有採用屬於小型輔助式的能源供給系統，此外垂直式風力發電機的葉片翼型斷面皆為相同之切面(uniform section)，無須扭轉(twisted)，使製造過程相對簡單許多。

水平式風力發電機：水平式風力發電機之軸承將平行於風向，表示其葉片與風向垂直，則須採用升力型葉片，目前水平式風力發電機較垂直式風力發電機可擷取更大之風能，即水平式風力發電機擁有些微高的發電效能係數(Power coefficient)，但隨著機構設計有著長足的發展，垂直式風力發電機的最大發電效能係數有提高的趨勢，此外水平風力發電機有必須迎風的限制，則必須能 360 度旋轉以追逐風場之風向，如以其旋翼座裝設位置分類又可分為上風型(upwind)及下風型(downwind)兩種。

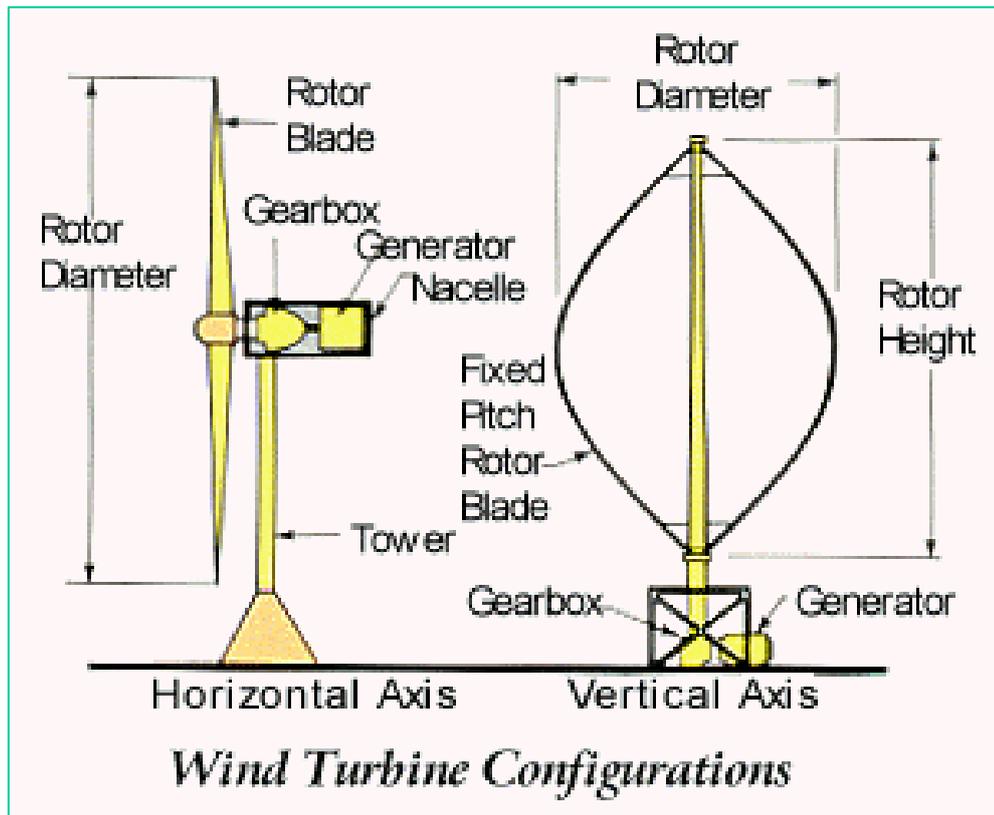


圖2-2 風力發電機種類示意圖

資料來源：Walker[1997]

肆、自然風場

Burton 等人 (Wind Energy Handbook, Burton 等人, 2001)提及真實風場下可利用的風能與風速的三次方成正比，其最顯著之特色為持續不斷變化的特性，不論於地理上或時間上(空間或時間)風在各種尺度的範圍都是高度變化的。大尺度來看，空間的變化是由氣候的變化所影響，在次尺度的影響是由地理因素所貢獻的，例如臨海區域或高山等，而時間的變化上，大尺度是由年份來觀察其變化，次尺度是由季節性的變化來影響風場的特性，小尺度則是用天數來觀察風的變化，圖 2-3 是手冊中風頻譜結果，Synoptic Peak 為氣候系統所產生，Diurnal Peak 為由地理位置影響一天風的變化，最小的時間尺度為比分鐘或秒更小的紊流(Turbulent Peak)所導致。

此外在於任何自然風場裝設風力發電機前，首先須了解選取地點自然風場的特性，須用定量之風向和風

速來描述此地理位置風的特性。風向是指風的來向，一般用方位表示，空氣自東向西流動便是東風，風速是指空氣的移動速度，一般以公里每小時或蒲福氏風級來表示，其分級如表 2-2。

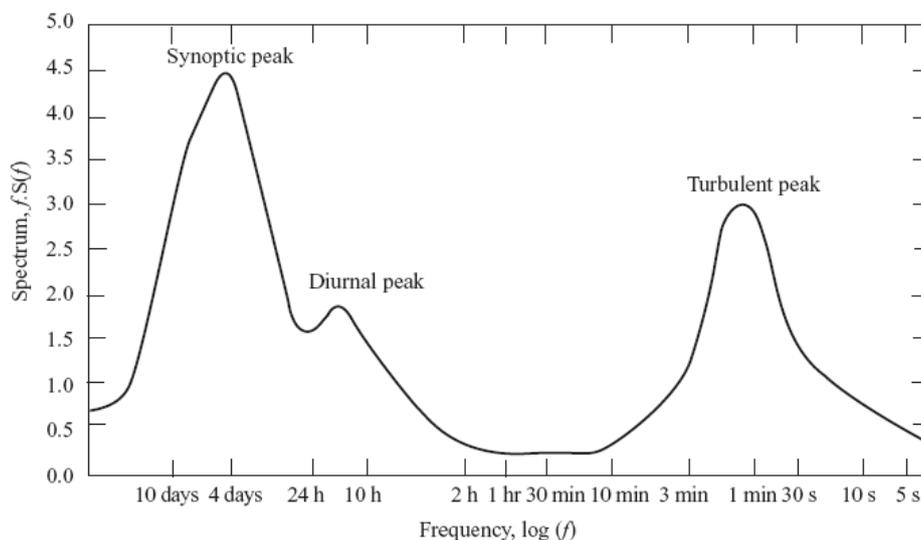


圖2-3 自然風場頻譜圖

資料來源：文獻：Burton[2001]

表2-2 蒲福風級表

蒲福風級	風之稱謂	一般敘述	每秒公尺	每時哩
0	無風 calm	煙直上	不足 0.3	不足 1
1	軟風 light air	僅煙能表示風向，但不能轉動風標	0.3-1.5	1-3
2	輕風 slight breeze	人面感覺有風，樹葉搖動，普通之風標轉動	1.6-3.3	4-7
3	微風 gentle breeze	樹葉及小枝搖動不息，旌旗飄展	3.4-5.4	8-12
4	和風 Moderate breeze	塵土及碎紙被風吹揚，樹之分枝搖動	5.5-7.9	13-16
5	清風 fresh breeze	有葉之小樹開始搖擺	8.0-10.7	17-21
6	強風 strong breeze	樹之木枝搖動，電線發出呼呼嘯聲，張傘困難	10.8-13.8	22-27
7	疾風 near gale	全樹搖動，逆風行走感困難	13.9-17.1	28-33
8	大風 gale	小樹枝被吹折，步行不能前進	17.2-20.7	34-40
9	烈風 strong gale	建築物有損壞，煙囪被吹倒	20.8-24.4	41-47
10	狂風 storm	樹被風拔起，建築物有相當破壞	24.5-28.4	48-55
11	暴風 violent storm	極少見，如出現必有重大災害	28.5-32.6	56-63
12	颶風 hurricane		32.7-36.9	64-71

資料來源：能源研究所

第二節 風力發電機性能

風力發電是利用空氣流動所以產生的風壓，藉由推動風車葉片旋轉，帶動發電機旋轉產生電能。由風能轉換成機械能的過程中，經由風車所捕捉風能受到風速及風車葉片的受風面積的強烈影響。風車所能捕捉的風能 mP 可表示

$$P_m = 1/2 \rho C_p V^3 A \quad (2-1)$$

其中 ρ 為空氣密度， C_p 為風車葉片功率轉換係數， V 為風速， A 為風車受風面積。由 2.1 式可知風車葉片由風中所擷取出的機械功率和風速成 3 次方正比關係，和風車葉片受風面積成正比，故在相同風速下，葉片面積會影響風車能量轉換的性能。 C_p 為葉片尖端速率比(tip speed rate) λ 的函數， λ 表示風車葉片前端的速度與風速的比值。可由下式表示。

$$\lambda = \frac{R\omega}{V} \quad (2-2)$$

由於 C_p 並非定值，理論上 C_p 的最大值為 59%，此即為貝茲極限(Betz limit)[14-17]，但在實際狀況中受到葉片形狀、空氣的黏滯性及最大功率追蹤之準確度等因素影響，實際的輸出係數約在 20%~40%。圖 2.1 為各類型風車 C_p 和 λ 的關係曲線。風車擷取到風能轉動後，帶動發電機旋轉將機械能轉換成電能，故發電機的輸出功率曲線受到 C_p 的影響，其輸出功率和轉速的關係呈現非線性關係。

1926 年 Betz 假設風力發電機的模式為一平均軸向速度於一葉片旋轉之圓盤，且不考慮切線與向心速度，應用能量及線性動量方程式進行推導，並假設在控制面上只有葉片可吸收風能，忽略黏滯力及紊流產生的損失，可得到下式：

$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad (2-3)$$

$$C_D = 4a(1-a) \quad (2-4)$$

$$a = 1 - \frac{U_a}{U_\infty} \quad (2-5)$$

其中 a 為軸向感應因子， U_a 為軸向通過旋葉掃掠面速度，求其極大值可以得到最大發電效能輸出如下：

$$a_{max} = \frac{1}{3}、C_{p,max} = \frac{16}{27} \quad (2-6)$$

此為理想風力機機械功率最大輸出限制(Betz Limit)，此式適用於升力型風力機，而阻力型風力機之最大發電效能輸出更低，在此將不再詳述，參考 De Vries(1983)之文獻。圖 2-5 為各式不同風力發電機之 $\lambda - C_p$ 圖，斜線部份為本測試所使用之風力機(Darrieus Rotor)效率區間。

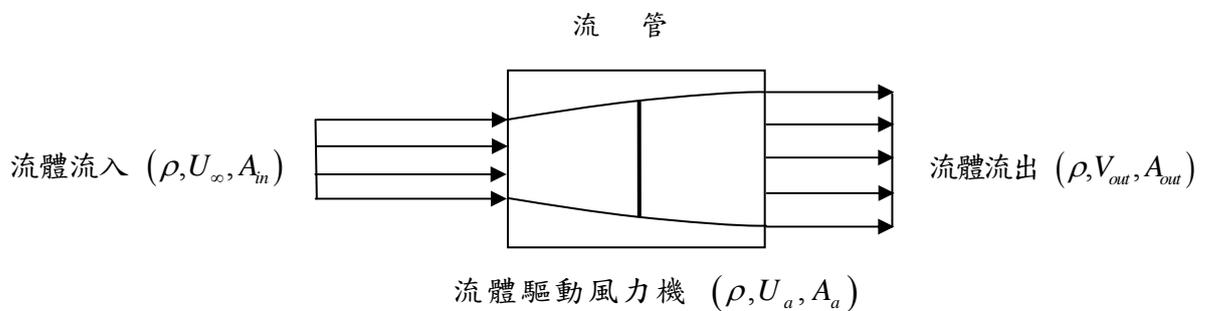


圖2-4 單流管模型

資料來源：文獻：De Vries. [1983]

小型風力發電機現地試驗方法建立
與風洞試驗比較研究

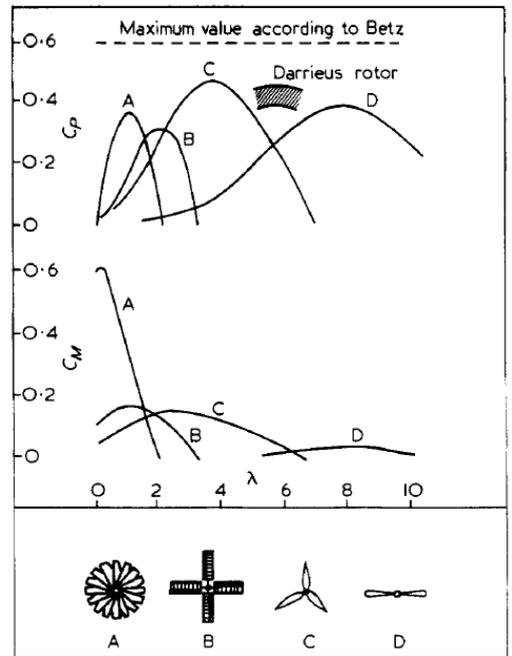


圖2-5 各式不同種類風力發電機之發電效能性能曲線

資料來源：文獻：Smulder, et al. [1976]

風力發電機的性能可藉由三個主要隨速度改變的指標來描繪出來，分別為發電效能(Power)、扭矩(Torque)和推力(Thrust)，發電效能可以決定葉片(Rotor)可以從風場中捕獲多少的能量，而扭矩可以決定當葉片帶動發電機時所需的變速箱大小及轉軸材料的需求，最後葉片的推力對整個風力發電機支架的結構設計有極大的影響；普遍而言性能指標都是經由無因次化後來表示，並透過在風洞中或真實風場中真實的操作來描繪出風力發電機的性能曲線，即在同一葉片翼型之下此三個性能指標將由尖端速度比(Tip Speed Ratio)及攻角(Angle of attack)之大小來決定，即可表示成三個函數曲線圖。

根據 Smulders(1976)在文獻中指出風力機系統可將風速(u_{∞})、空氣密度(ρ)、空氣黏滯係數(μ)及葉片半徑(R)視為輸入變數，並將軸扭矩(Q)、轉速或轉動頻率(RPM)和軸向力(D)視為輸出變數，運用上述之變數經過無因次化後可描述出風力機穩定狀況下的操作特性，無因次化如下：

$$\lambda = \frac{r\omega}{u_{\infty}}$$

尖端速度(Tip speed ratio)： (2-7)

$$\text{扭矩係數(Torque coefficient): } C_q = \frac{Q}{\frac{1}{2} \rho u_\infty^2 \cdot A_s \cdot r} \quad (2-8)$$

$$\text{發電效能係數(Power coefficient): } C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho u_\infty^2 \cdot A_s \cdot u_\infty} = C_q \cdot \lambda \quad (2-9)$$

$$\text{阻力係數(rotor-drag coefficient): } C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho u_\infty^2 \cdot A} \quad (2-10)$$

發電效能係數代表空氣流經掃掠面積含有之動能所能由葉片擷取的百分比，風速對其為三階的影響，此外 C_q 、 C_D 的因次分析也可得到關於翼尖速度(λ)的函數風速對其為二階的影響，所以風力發電機基本的性能特色可以表示為以下函數型式： $C_p(\lambda)$ 、 $C_q(\lambda)$ 、 $C_D(\lambda)$ 。

風力發電機主要利用流過風力機葉片表面的空氣發生直接影響風力機性能的二力—升力與阻力。升力在流入空氣流的垂直方向作用，阻力在空氣流的平行方向作用。風能理論是 1919 年德國物理學家貝茲發表的，他由理論計算出理想的高速風機（無摩擦）其風能利用係數可達到貝茲極限（ $C_p \sim 0.593$ ），在經電力轉換與機械損耗等輸出效率約 0.2~0.4。

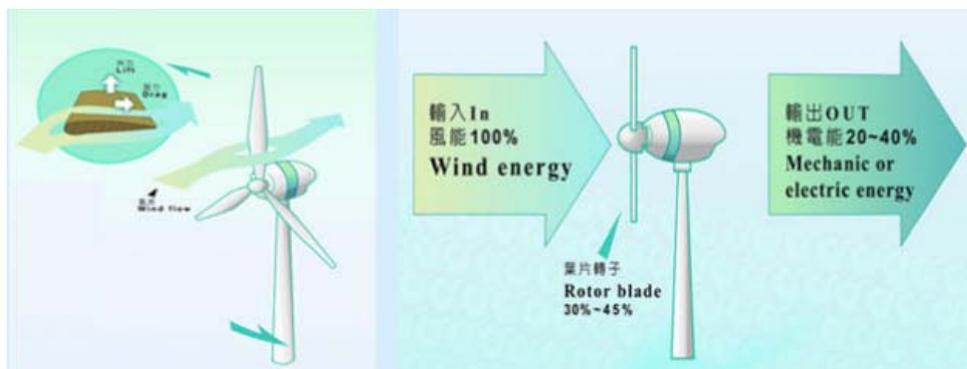


圖 2-6 風力機的作動原理

資料來源：本研究整理

小型風力發電機現地試驗方法建立
與風洞試驗比較研究

第三章 風力機實場量測平台

本研究在台南歸仁風洞館頂樓進行小型風力機實場量測平台的建制，該地點地處空曠周圍環境沒有相對較高的建築物遮蔽（如圖 3-1 所示），適合進行長時間風力機發電性能量測及實場風速資料庫的建立。



圖3-1 風洞館頂樓周圍環境現況

資料來源：本文整理

本研究將設計小型風力機及風速計支架安裝電梯維護間的屋頂，固定的支架高過女兒牆 1.5 米，風速計與發電機平行架設，兩者之間距為 8.4 米，風力機的葉片直徑為 1.06 米（如圖 3-2 所示）。



圖3-2 風速計及小型風力發電機現場架設圖

資料來源：本研究整理

風速計與風力發電機現場改善後相對位置配置

本實驗在進行之初只規劃一台風速計進行風速量測，其安裝位置位於風力發電機西側進行參考風速的量測。於期中審查時有委員建議應該在風力機的北側增加一台風速計，因為如果風向如果由東往西吹，原本的風速計便處於風力發電機下游，而風力機因旋轉發電時會造成下游流場相當混亂，進而影響風速計量測的準確性。因此架設兩台風速計分別位於風力機的西側與北側時得以確保其所量測風速會有一台是較為正確。數據資料擷取時，將同時擷取兩台風速計的速度值，並選擇風速值較大者作為參考風速，因為自然風場的风通過發電機將有一部份的能量被擷取轉換成電能，洞能會降低會使得風速也會降低。

圖 2-2 風力發電機及風速計安裝位置圖

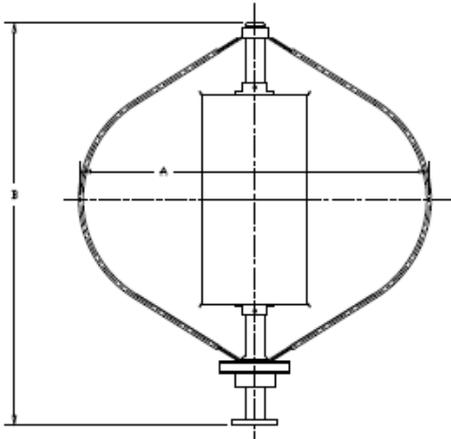


表3-1 本研究風力發電機規格

小型風力發電機現地試驗方法建立
與風洞試驗比較研究

HiEnergy Vertical Axis Wind Turbine Power System
Model: DS200

PRODUCT SPECIFICATIONS

General Specifications				
Rated Power	200W	Rated Wind Speed	12 m/s	
Rated Speed	650 rpm	Cut in Wind Speed	<3 m/s	
Cut out Wind Speed	15 m/s	Survival Wind Speed	60 m/s	
Dimensions/Weight				
Rotor Diameter	1.06m			
Rotor Height	1.52m			
Tower Height	No tower			
Total Height	1.52m			
Turbine Weight	36kg			
Rotor Specifications				
External Darrieus	3 Blades	Power Curve 		
Internal Savonius	2 layers			
Blades Material	Anodized Aluminum			
Surface Treatment	Powder Coating			
Axis Material	Galvanized Steel SS400			
Generator Specifications				
Generator Type	AC, 3phase, Synchronism PMG	Braking System		
Rated Output	200W			
Automatic				Over speed short circuit braking system
Manual		Mechanical Drum Brake	Operation Conditions	
Ambient Temperature	-10~40°C			
Ambient Humidity	95% max.			

資料來源：新高能源公司

高功率電子負載

本實驗將使用 PRODIGIT 公司所生產的 3350 系列高功率電子負載系統，此高功率電子負載系統主要是用來模擬風力發電機搭載負載的情況並測試評估在不同之負載下所能輸出的發電效能，其具有 GPIB/RS-232C 介面及面板手動兩種操作方式，而且可以在定電流、定電壓、定電阻及定功率四種不同模式下進行操作，而本實驗將採用定電阻模態下進行資料擷取，而電阻值設定範圍在 2~100Ω，此實驗系統將應用 RS-232C 介面進行遠端控制其電子負載，其電壓和電流工作範圍分別為 0-60V 與 0-360A。



圖3-4 PRODIGIT 公司 3350 高功率電子負載

資料來源：本研究整理

風速計

在實場風速量測上本研究採用英國 GILL 公司生產的雙軸向的超音波風速計，其量測風速為 0~60m/s 風向角為 0 度至 359 度，可以防水適合戶外長時間量測，數位輸出 RS232/422/485/SDI-12 等多種形式可選擇，本研究將採用 RS232 訊號線進行訊號輸出，該風速計的性能特性如表 3-2 所示。

小型風力發電機現地試驗方法建立
與風洞試驗比較研究

表3-2 GILL 公司風速計性能特性

CUSTOMER SELECTABLE	
Output	1, 2 or 4 outputs per second
Parameters	Wind Speed & Direction or U and V (vectors)
Units of Measure	m/s, knots, mph, kph, ft/min
WIND SPEED	
Range	0 – 60 m/s (116 knots)
Accuracy	+/- 2%
Resolution	0.01 m/s (0.02 knots)
WIND DIRECTION	
Range	0 to 359° – no dead band
Accuracy	+/- 3°
Resolution	1°
ANEMOMETER STATUS	
Message supplied as part of standard output	
POWER REQUIREMENT	
Anemometer	9-30Vdc @ 14.5mA typical Start up time <1 second
OUTPUTS	
Option 1	RS232
Option 2	RS232 + RS422 + RS485 + NMEA*
Option 3	RS232 + RS422 + RS485 + NMEA* + 0-5V or 4-20mA
Option 4	SDI-12 + RS232
* NMEA 0183 Version 3	
ENVIRONMENTAL	
Ingress Protection	IP65
Operating Temperature	-35°C to +70°C
Storage Temperature	-40°C to +90°C
Operating Humidity	<5% to 100%
EMC	EN 61000-6-2 : 2001 EN 61000-6-3 : 2001
MTBF	
15 years	
MATERIALS	
External Construction	LURAN S KR 2861/1C ASA/PC
DIMENSIONS	
Size	142 x 160 mm
Weight	0.45 kg
WARRANTY	
2 years	
OPTIONAL FACTORY CALIBRATION	
Traceable to national standards	
ACCESSORIES	
Pipe Mounting	44.45 mm (1.75 in) diameter
WindCom - Display & logging software *	
Cables	
Display	
* download WindCom free from www.gill.co.uk	

資料來源：GILL instruments 公司網站

轉速速計

本次實驗量測其中一個項目為比較風力發電機轉速及發電效能關係，所以在風力機下方裝置一個 SICK 公司的生產的轉速計（接近開關），近接開關的原理是感應電壓的變化，特定的以金屬為被測物體，感應距離很短，通常在數釐米之間，最大優點是快速、準確、耐髒。



圖3-5 轉速計

資料來源：SICK 公司網站

交直流轉換暨二段式煞車系統

本研究所使用之風力發電機所產生的電流為交流電，而高功率電子負載所能量測為直流電，所以需要一個轉換系統，所以本研究利用一個電容及簡單電路系統進行轉換。同時考慮到高風速時，風力發電機需要有一煞車系統，其目的用以減低風力發電的轉速，避免風力機本身損壞，所以利用高功率電阻提供一個風力發電機的負載。

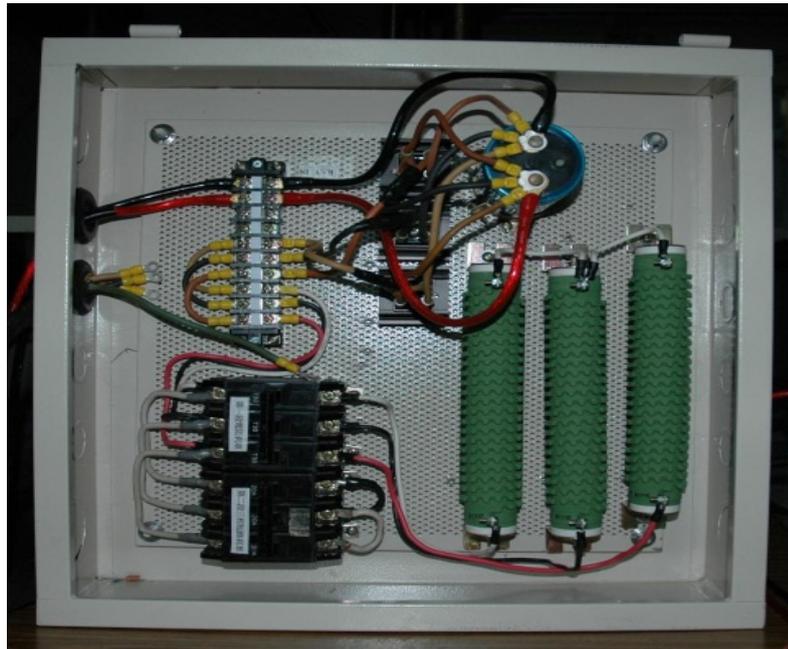


圖3-6 交直流轉換暨煞車系統

資料來源：本文整理

資料擷取系統

本實驗量測系統利用 Visual Basic 撰寫資料擷取程式，透過 RS232 傳輸線對高功率電子負載、轉速計及風速計進行資料擷取，取樣速率由程式直接給定進行控制，電子負載的電阻大小可由高功率電電子負載上進行調整。

小型風力發電機現地試驗方法建立 與風洞試驗比較研究

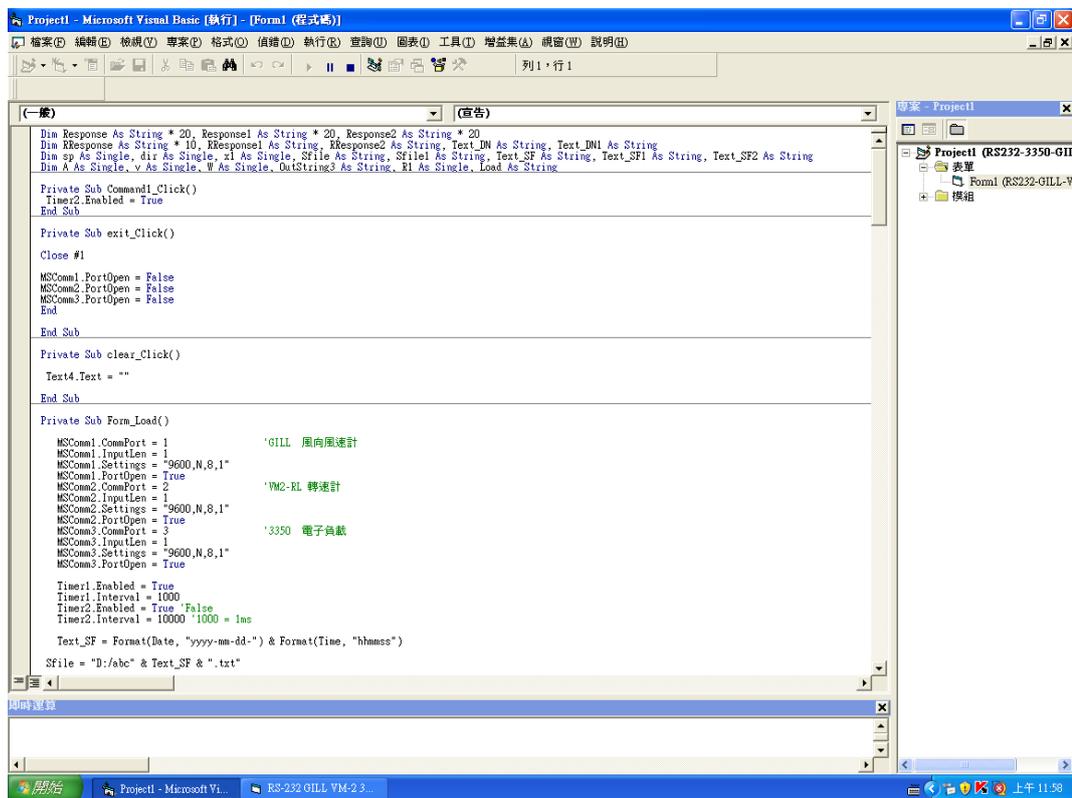


圖3-7 VB 資料擷取程式

資料來源：本文整理

第四章 現場量測方法及風洞實驗結果

根據 IEC61400 風力機性能驗證的方式分為兩種，其一為較短時間的量測，需要風力機所設計最高額定風速下進行連續 300 個小時的測試，目前國外針對對這種測試方式為使用車輛進行長時間行駛，並把風力機架設於車頂進行性能量測，另一種方式為長時間量測，需要架設在一固定位置進行 180 天量測，而量測過程需要有至少 10 分鐘以上的樣本數超過而定風速。本研究利用風洞館頂樓進行現場風速與風力發電機的效能的量測，希望建立一個符合 IEC-61400 規範的風力機性能驗證平台。



圖4-1 內政部建築研究所風洞實驗室外觀

資料來源：本研究拍攝

貳、風速量測

本實驗風速量測是利用 GILL 所生產的雙軸超音波風速計，進行風速及風向角的量測，並且透過 RS232 傳輸線將數據資料傳送至電腦。目前規劃量測取樣頻率為每 10 秒鐘取一個次樣本數，記錄風速及風向角，並且同時進行長時間量測，並將所得到的資料經由統計的方式進行分析，同時比對小型風力發電機起使風速及發電效能與風速之間的關係。

參、風力機發電效能檢測

小型風力發電機透過四芯電線與交直流轉換系統做連接，將最後電流電壓輸出端接到高功率電子負載系統上，可以透過 VB 的程式去控制風力機運轉過程是否加上負載，並且透過 RS232 傳數風力機的電流、電壓、輸出功率及目前電子負載上的阻抗大小，目前規劃量測取樣頻率為每 10 秒鐘取一個次樣本數，取得足夠數據後進行統計及分析發電效率與風速或轉速相關性。

第二節 風洞實驗的結果

本研究另一個目的是比對該風力機在風洞內測試性能曲線及其他相關資料，而該小型風力發電機已於本所 97 年協辦案「小型風力發電機測試平台之建立」進行過相關風洞實驗，由實驗結果可以發現 DS-200 的風力發電機在風洞內起使風速經過多次試驗結果平均約為 3.8m/s，風洞內流場為均勻流場且流場方向為單一方向，該風力機起使風速與風攻角有關，所以在起始風速上實場量測可以得到較低的風速。

在空載狀態下，DS-200 發電機在起使風速以上，入流流速為 5m/s 至 13m/s，由協辦案所得的結果可以發現，風力機轉速與入口流速成現正比的關係，在 5m/s 風速下約為 200rpm，當風速到達 13m/s 時轉速上升至 1000rpm。在輸出直流電壓結果上可以發現，在最低實驗風速時，輸出電壓約為 8V；當入口風速上升至 13m/s 時，風力機輸出電壓上升至 44V。

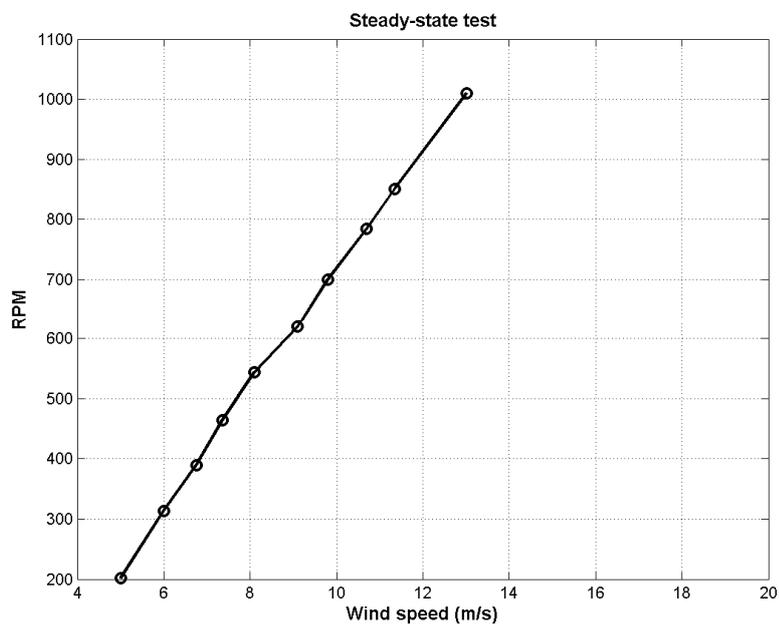


圖4-2 風力機無負載狀況下轉速與風速的關係圖

資料來源：97 年本所協辦案

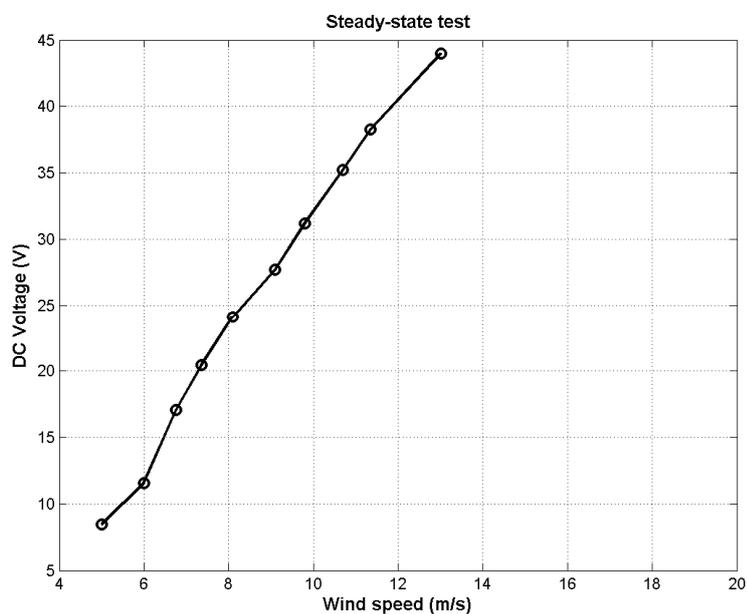


圖4-3 風力機無負載狀況下輸出電壓與風速的關係圖

資料來源：97 年本所協辦案

小型風力發電機現地試驗方法建立 與風洞試驗比較研究

在風力機加上負載開始發電時，進行相同風速區間風洞試驗，所得到的性能曲線如圖 4-4 所示，由圖上可以觀察出在低風速時發電效能很低，高風速時可以得到較好的發電效率，但是整體發電效率比原公司聲稱的發電效率較低。圖 4-5 為 DS-200 效能係數與風速關係結果，由圖上可以發現超過額定風速時，發電機的發電效能係數約為 0.2。

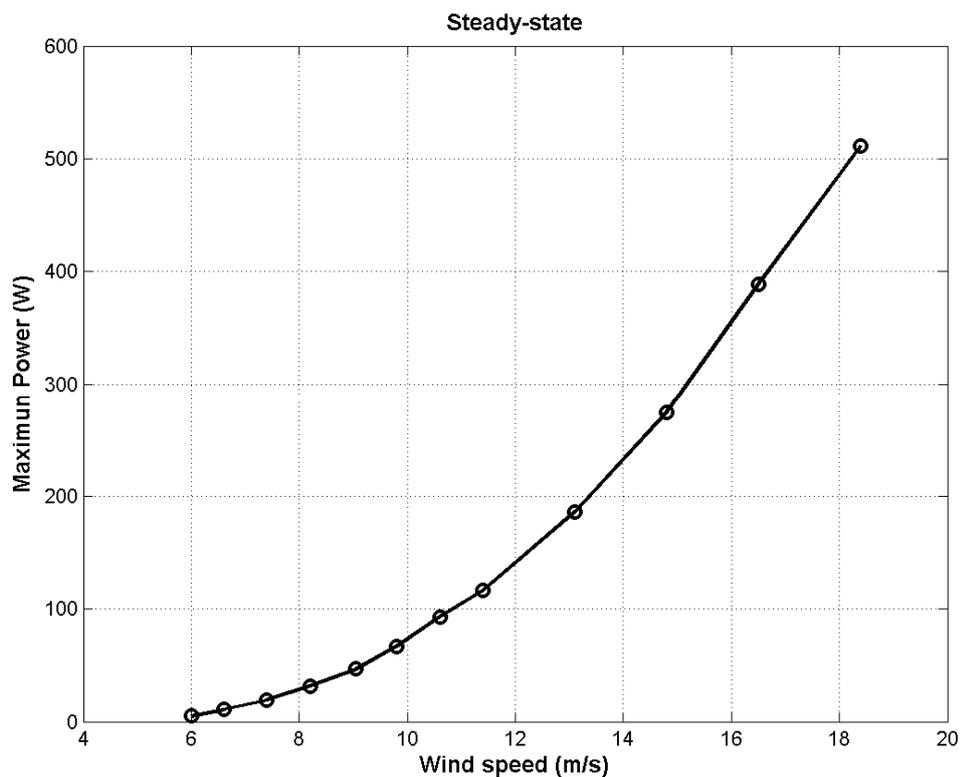


圖4-4 DS-200 風力機性能曲線圖

資料來源：97 年本所協辦案

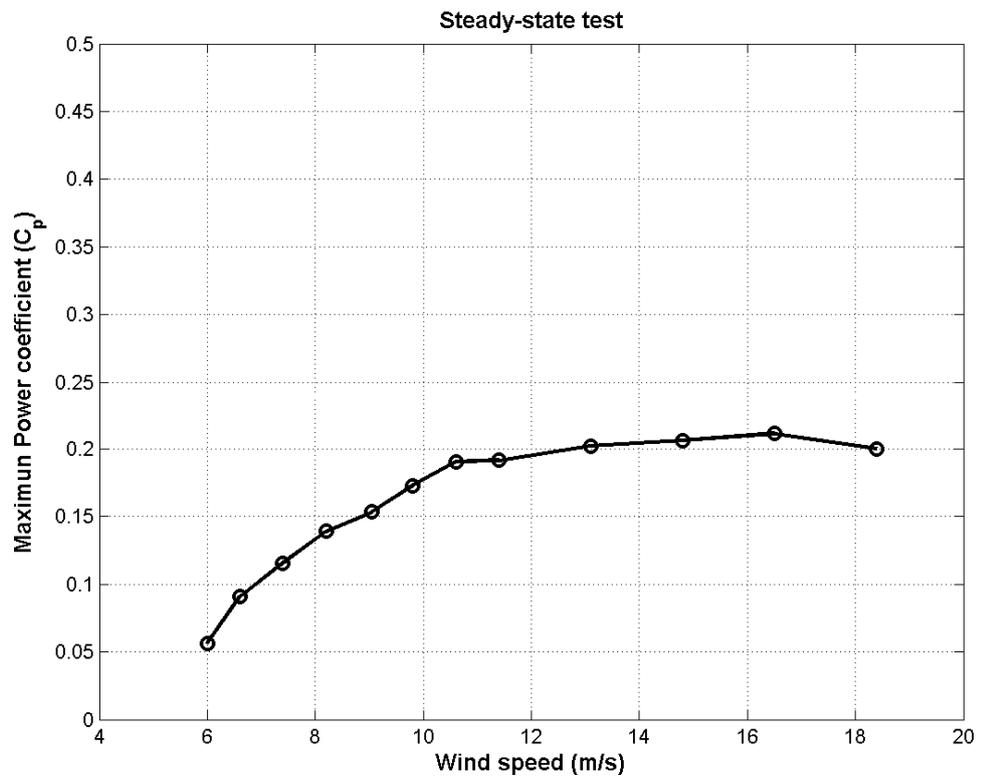


圖4-5 DS-200 風力機發電效能係數曲線圖

資料來源：97 年本所協辦案

第五章 試驗架設及量測結果

小型風力發電機現場量測平台目前已經完成架設，同時開始測試系統穩定性，將會開始進行長時間量測，及現地風速數據資料統計。

第一節 量測平台硬體架設過程

本研究在開始之初便著手進行規劃小型風力機發電機實場量測架設位置，並設計小型風力發電機支架及相關固定平台加工作業，於5月底完成風力機與風速計現場支架設及組裝工作。



圖5-1 風力發電機實場量測平台架設過程

資料來源：本文整理

量測儀器平台組裝也同時進行穩定度的測試，並開始撰寫資料擷取系統程式，目前已經完成程式與儀器量測平台初步的測試。與七月中開始進行資料系統的擷取，目前規劃擷取數據速率為10秒鐘擷取一次，資料包含了風向

角、風速發電機轉速、負載啟動與否、電壓、電流發電效能與負載電壓數據，同一天存取的数据寫入同一個檔案。



圖5-2 資料擷取程式執行畫面

資料來源：本研究整理

。

第二節 風力機量測結果

夏季季風量測結果

實場量測平台已於7月中下旬完成建制，實驗數據已經開始擷取，目前已有幾日的風速及DS-200風力機性能資料。風速資料將彙整如圖5-3及5-4所示之風速及風向角的關係圖。7月18日因為巴士海峽有颱風通過，雖然沒有颱風沒有登陸但南部風速平常日較大，可以由圖上觀察出所測得數據大部分都分佈在120度至240度的範圍，圖上0度的定義為北方，所以7月18日以西南風向佔大部分時間。

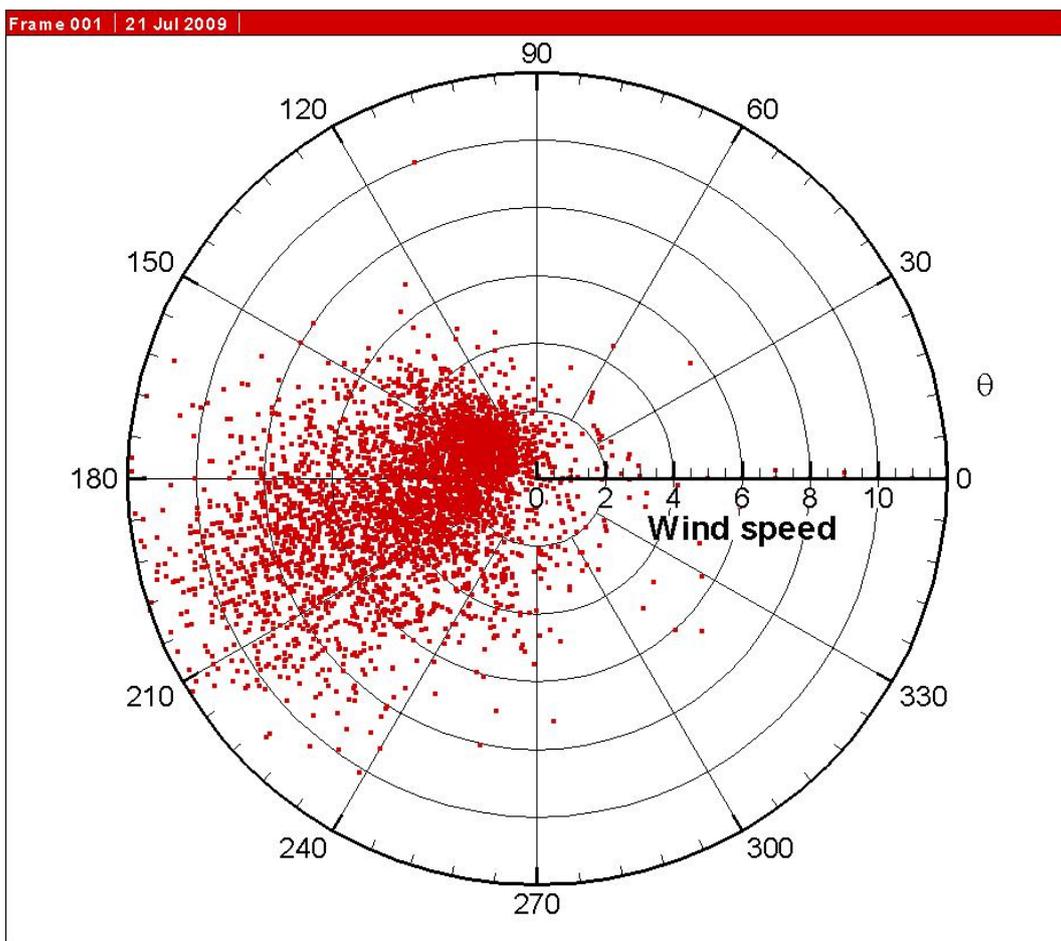


圖5-3 風洞館頂樓7月18日風速資料

資料來源：本研究整理

圖 5-4 所呈現為風速較低風洞館頂樓風速資料，由圖上可以看出風速較前一天小，且以西南風為主要風速分佈。

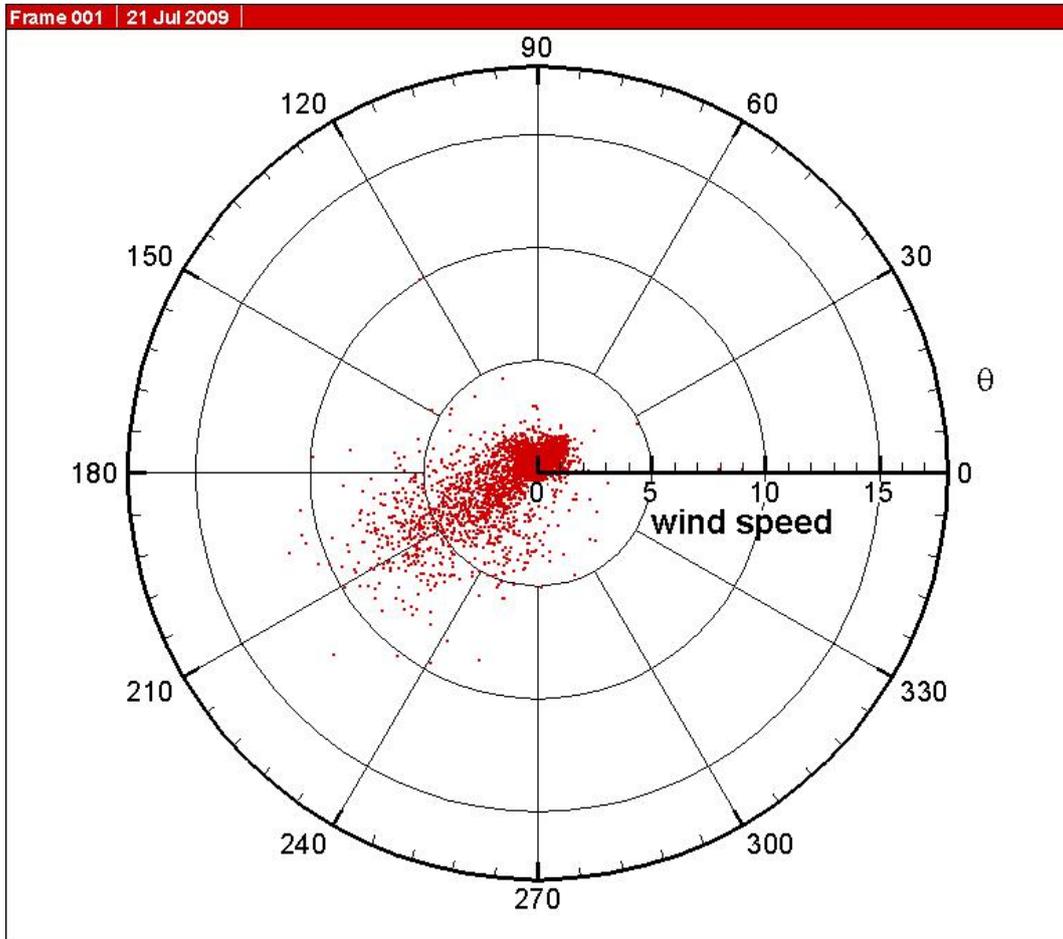


圖5-4 風洞館頂樓 7 月 19 日風速資料

資料來源：本研究整理

圖 5-5 與 5-6 為 7 月 18 日分別為風速及發電機轉速與小型風力發電機效能關係圖，由圖上可以觀察到該日均風速較高，發電機具有較高的發電效能，發電機的轉速都能維持較高轉速下發電機的效能較佳。圖 5-7 與 5-8 為 7 月 19 日的實驗結果，轉速與發電效能的關係曲線與 18 日趨勢相似，因環境風

小型風力發電機現地試驗方法建立
與風洞試驗比較研究

速較低所以發電量較高的時間比例較低。

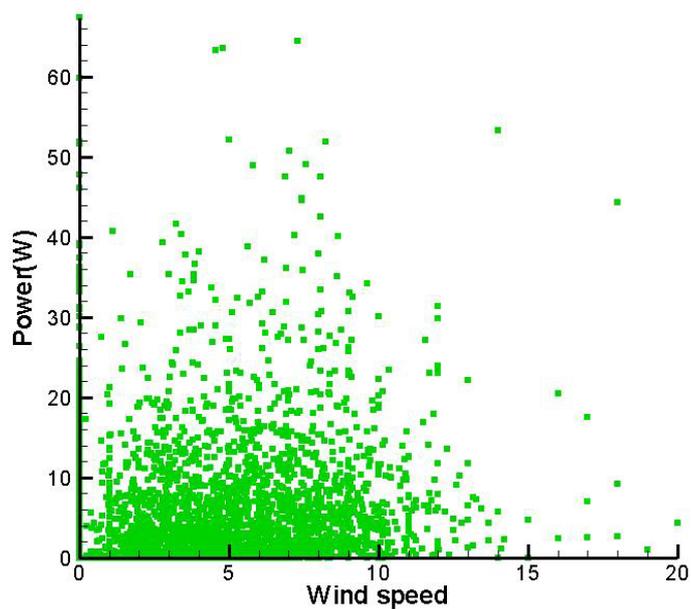


圖5-5 風力發電機 7 月 18 日發電效能與風速關係
資料來源：本研究整理

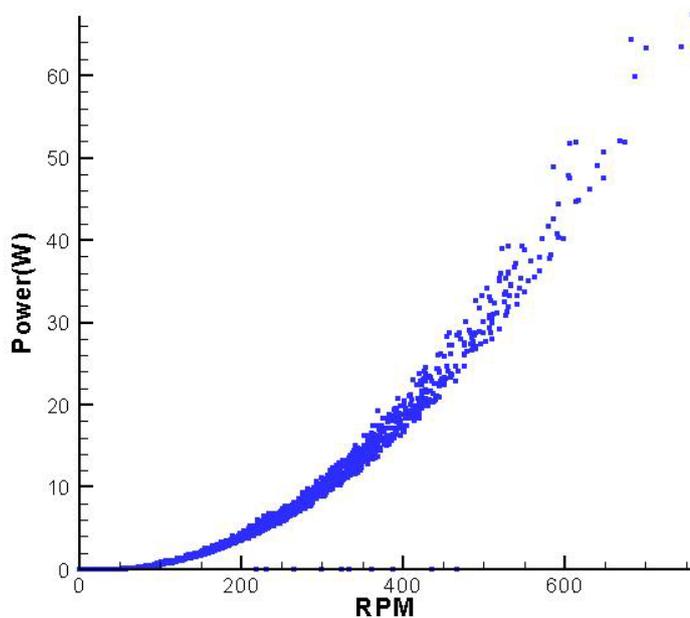


圖5-6 風力發電機 7 月 18 日發電效能與轉速關係

資料來源：本研究整理

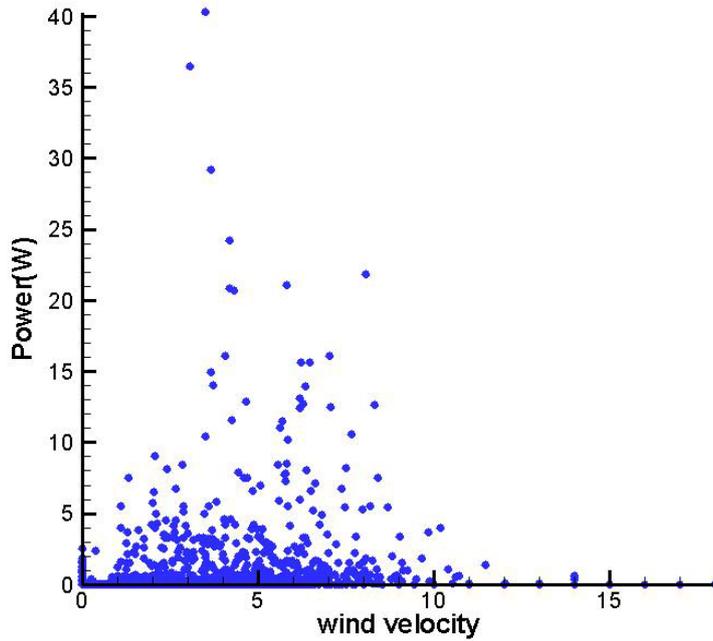


圖5-7 風力發電機 7 月 19 日發電效能與風速關係

資料來源：本研究整理

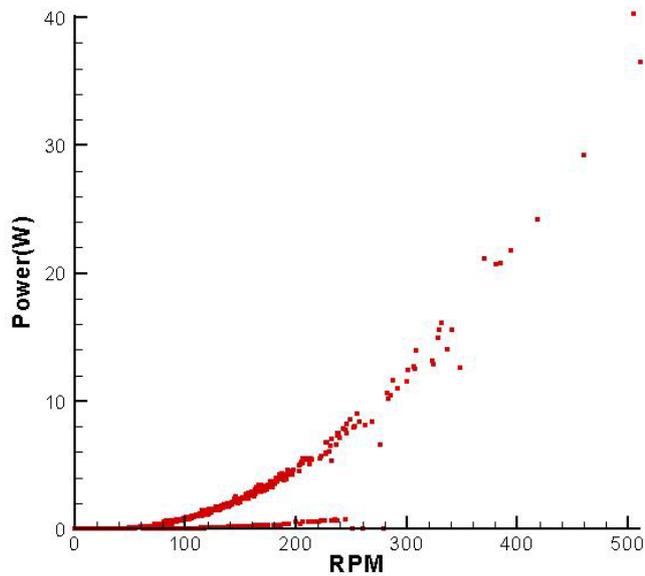


圖5-8 風力發電機 7 月 19 日發電效能與轉速關係

小型風力發電機現地試驗方法建立 與風洞試驗比較研究

資料來源：本研究整理

秋冬季節風力機量測結果

11月中下旬時北方高氣壓開始南下，現場所量測得到高風速時間較長，風力機可以發揮較高的發電效能，圖 5-9 為 11 月下旬風速較高的情況下現場所量測到風速與風向角的關係圖。由圖上可以發現風洞頂樓所量測得到以西北風所佔時間比例較高，並且有較長時間風速超過 5m/s，最高風速約為 12m/s。

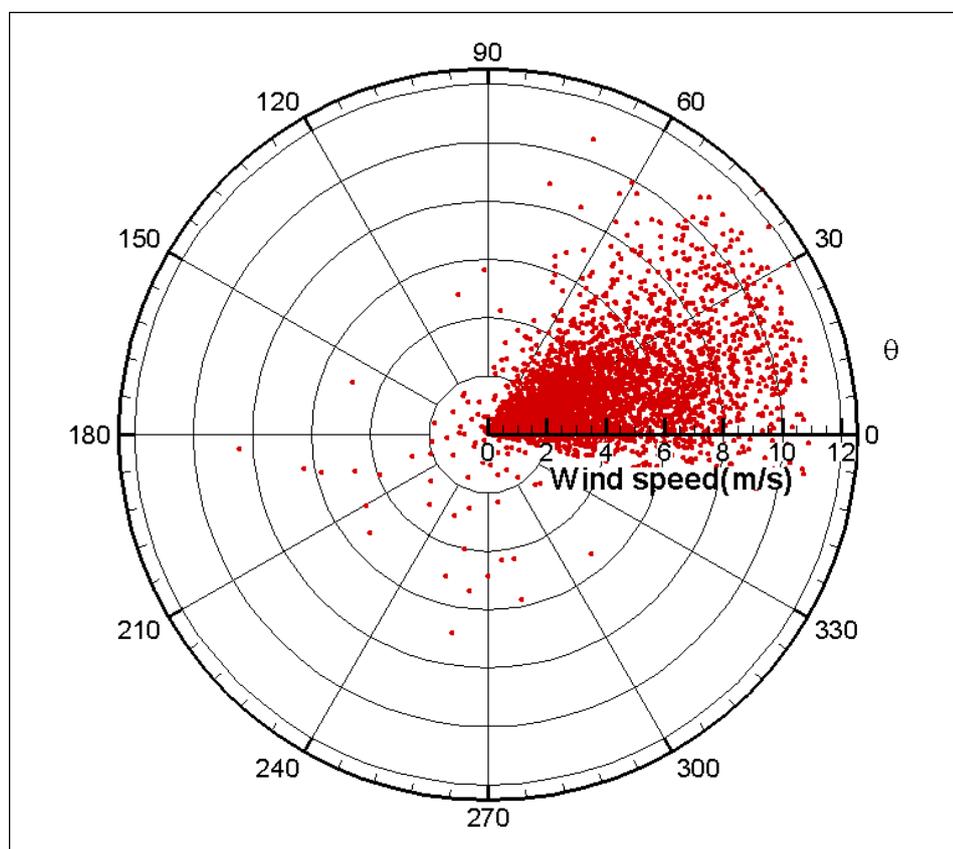


圖5-9 11月下旬高風速時所測得風速與風向角資料

資料來源：本研究整理

圖 5-10 為該段時間風力機所輸出發電效能與風速的關係圖，由圖上可以

觀察到在目前量測到最大風速約為 12m/s 時，發電機的發電效能約為 90~95 瓦，比較風力機在風洞測試時，在相近的風速下其發電效能已經超過 100 瓦，實場監測的數據較風洞試驗的數據低。同時可以發現冬季所呈現的風速與發電效能的規則性較夏季風速時為高，其主要原因為此段時間風場在高風速下持續的時間較久，而風力機轉速可有較高時間能量克服慣性力及轉軸黏滯力增加轉速，可以提供較大發電效能。反觀在夏季時，可能因為風洞館頂樓發生高風速的時間較短，而且通常持續時間很短，造成風力機尚未把轉速提升時已經變成低風速了，造成其發電效能與風速之間較無規則性。

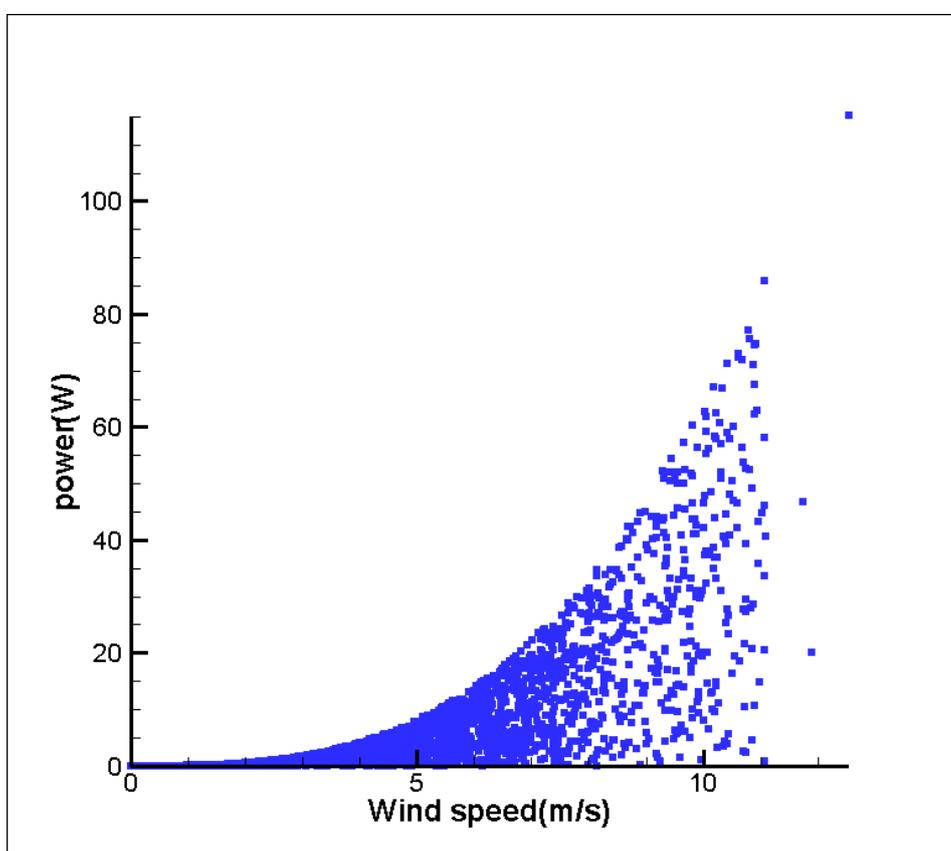


圖5-10 11月下旬高風速時所測得風速與發電效率資料

資料來源：本研究整理

圖 5-11 為發電機輸出直流電電壓與風速關係圖，高功率電子負載的電阻值為可調式，目前設定為 2-10 歐姆之間，所以在不同速度下電阻值進行風力

小型風力發電機現地試驗方法建立 與風洞試驗比較研究

機抽電工作，由圖上可以發現在高風速下有較高的電壓輸出，在風速 12m/s 時輸出電壓約為 28V，此結果較風洞為低，其原因可能為風洞風速較為穩定可以調整出每個風速下最大輸出發電效能及電壓電流，而目前本試驗平台的阻抗設定間距較大，所以可能無法得到最大輸出能量。

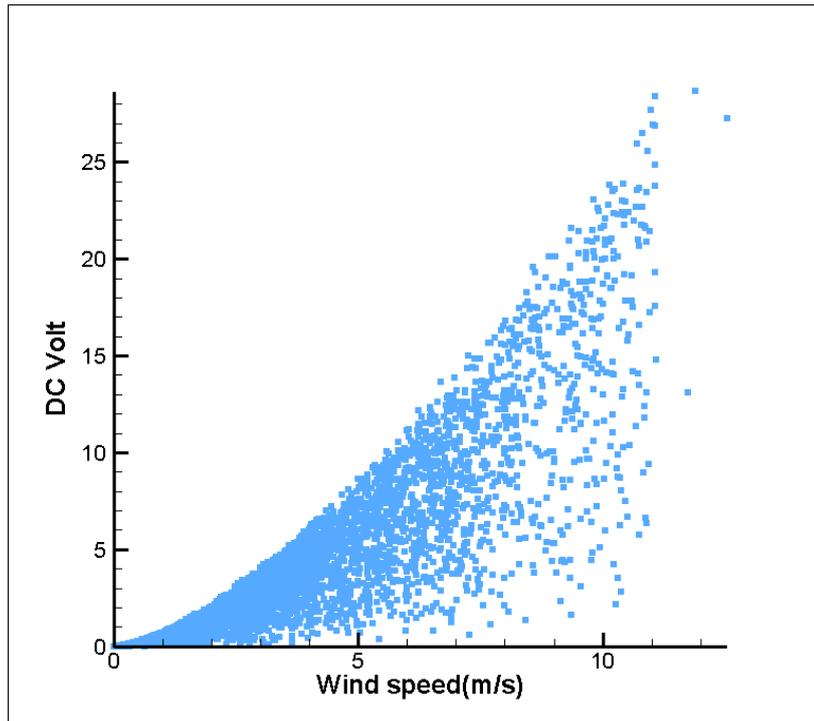


圖5-11 11月下旬高風速時所測得風速與輸出電壓資料

資料來源：本研究整理

風力機發電效能與環境風速長時間紀錄結果

本研究將7月中旬至11月下旬風速資料與風力機發電效率進行一個長時間紀錄，並根據所測得風速與輸出發電效能計算出，圖 5-13 為經由平均後所得的發電效能係數與風速的關係圖。由圖上可以觀察出在高風速下（約 12m/s），風速機最大發電效能係數約為 0.18，而風力機在風洞實驗時，在相似的風速下發電效能係數約為 0.2，明顯較實場量測結果高。在統計過程可以發現，在高風速下因為所得之資料筆數較少，其變異係數（標準差/平均值）較大，而在低風速下變異係數較小，如圖 5-14 所示。

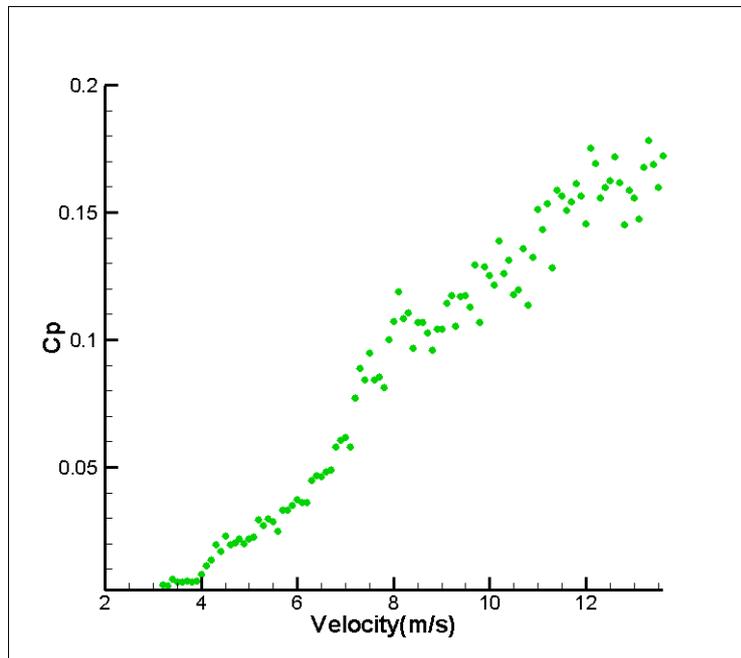


圖5-12 不同風速下風力機輸出發電效能係數關係圖

資料來源：本研究整理

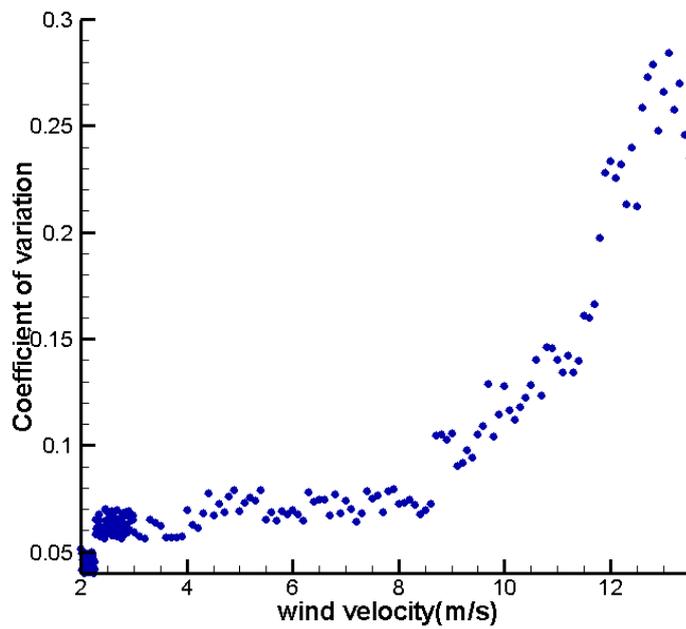


圖5-13 不同風速下風力機輸出發電效能變異係數關係圖

資料來源：本研究整理

小型風力發電機現地試驗方法建立 與風洞試驗比較研究

風力機在風洞實驗與實場量測之發電效能如圖 5-14 所示，由圖上可以觀察出風洞實驗結果發電效能較實場量測為高，特別是在高風速下風洞結果較佳，但起使風速為實際風場下可在較低風速下便啟動，實場量測與風洞實驗結果比較如表 5-1 所示。

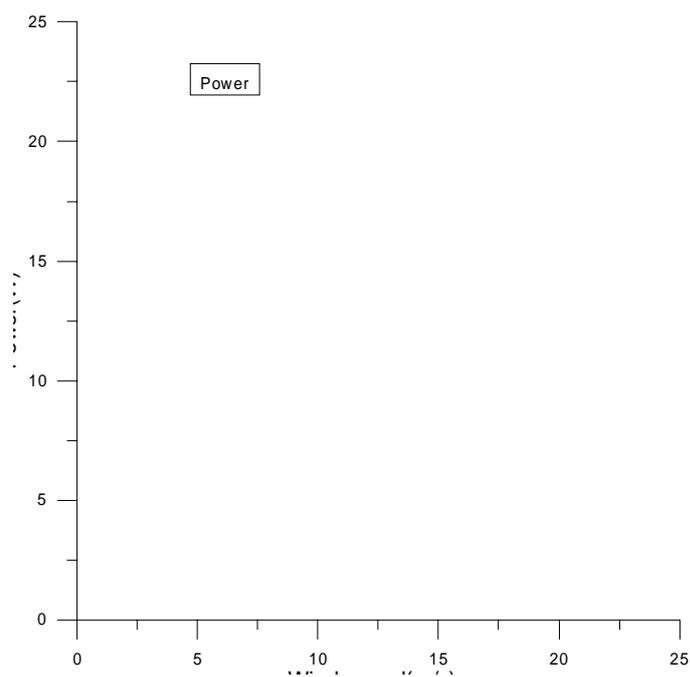


圖5-14 風力機發電效能於實場量測與風洞實驗之比較
(資料來源：本研究整理)

表5-1 風洞測試與實場量測結果比較表

項目	風洞試驗結果	實場量測結果
起始風速	3.8m/s	<2m/s
高風速的發電效率 (11.5 m/s)	110W	85W
高風速下發電效能係數 (Cp)	~0.2	~0.18

(資料來源：本研究整理)

小型風力發電機現地試驗方法建立
與風洞試驗比較研究

(資料來源：本研究整理)

第六章 結論與建議

第一節 結論

本研究的風力發電機實場量測平台已經建置，也已經量測風力機發電效能，並經由長時間統計，目前有以下結論：

- a 風力起始風速在自然風場下約為 1.5~2m/s，此結果較風洞結果為低。推測其原因測試的流況為紊流場的風場，本試驗之風力發電機為垂直軸發電機，可以在較容易在紊流下啟動。
- b 風力機目前性能數據表現較原公司數據低，但目前數據量有限，需要做長時間量測統計。且風力機在風洞均勻流場的狀況底下，因為來流風速可以穩定且持續，因此可能可以得到較高發電效能。在實場狀況下，風速無法持續維持一固定風速，所以發電機轉軸需先克服慣性及摩擦力，所以得到發電效能會較小，以目前實場量測得到最大風速 12m/s，發電機發電效能與風洞試驗相差超過 10 瓦。
- c 風力機負載不同電阻會影響風力機轉速，相同風速下持續抽電會造成風力機發電效能降低。目前風力機設定的負載為 2-10 瓦，而且為上一筆量測完後，根據風速作為調整，因此風能擷取上會有所損失。
- d 風力機目前實場量測在高風速下數據（超過 10m/s）以上資料相對較少，變異係數相對較高，在 12m/s 時變異係數超過 25%，以工程上而言需要更多數據以確定在高風速下發電效率。

第二節 建議

短程建議

- a 持續進行風力機性能監測，累積較多風力機發電效率數據，根據 IEC-61400 規範中規定實場量測需要有 180 天以上的量測數據。

小型風力發電機現地試驗方法建立 與風洞試驗比較研究

- b 找出不同風速下最佳負載電阻，得以測得風力機最大發電效率。目前設定的負載電阻為 0-10 歐姆，所以必須將每個風速下最佳電阻以程式進行控制，在資料擷取時把風速資料取得時需即時調整，以取得最佳化發電效能曲線。
- C 目前測試平台因為電腦系統有時會不穩定，在長時間資料擷取的狀況下，需要定時去監測電腦以防當機，造成數據資料不連續，所以可針對電腦設定微調，並持續監測檢測穩定度。

中、長程建議

- a 評估資料擷取系統中每一項設備的誤差，得以計算出該項測試的總體誤差，以作為申請 TAF 認證過程所需資料。
- b 建立一個穩定的檢測平台。目前風洞試驗中小型風力機測試案件已有增加趨勢，可見國內產業對小型風力機發展的是相當快速，所以需要一個機構對廠商的風力機性能去做一檢驗，所以本研究希望建立一個穩定的測試平台。
- c 風場資料可以長時間累積，並且將長時間累積的風場資料與氣象局在歸仁附近地區的觀測站結果比較，風場資料可以提供日後風力機測試參考資料。

參考書目

British Wind energy Association Small Wind Turbine Performance and Safety Standard, 2007 March

Burton, T. Sharpe, D., Jenkins, N. and Bossanyi, E., Wind Energy Handbook, Wiley, 2001.

De Vries, Otto, "On the Theory of the Horizontal-Axis Wind Turbine," Ann. Rev Fluid Mech. 1983. 15.77-96

IEC 61400 規範

International Energy Agency "World Energy Outlook," 2007.

Global wind energy council "Global wind report", 2008.

Global wind energy council "Global wind report", 2006

Sheinman, Y. and Rosen, A. "The average output power of a wind turbine in a turbulent wind", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.51, pp.287-302, 1994

Sheinman, Y. and Rosen, A., The power fluctuations of a wind turbine, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 59, 51-68, 1996

Sheldahl, R. E. and Blackwell, B. F., wind tunnel performance data for the Darrieus wind turbine with naca0012 blades, Sandia report SAND76-0130, 1977

Sheldahl, R. E., Comparison of field and wind tunnel Darrieus wind turbine data, Sandia report SAND80-5469, 1981

Smulders, P T "Physical aspects of windmill design," Physical in Technology, 1976

R euter, Robert C., Worstell, Mark H., Torque Ripple in a vertical axis wind turbine, Sandia report SAND78-0577, 1978

Walker, J. F., "Wind Energy Technology," John Wiley & Sons Inc., 1997

Worstell, M. H., Aerodynamic performance of the 17meter diameter Darrieus wind turbine in the three-bladed configuration: addendum, Sandia report

SAND79-1753, 1982

能源研究所第十八號報告，風能利用(How to Harness Wind Energy)，工業技術研究院能源委員會, 1982

建研所協報案報告，小型風力發電機量測平台建置，2008

. 張希良，風力發電技術，新文京開發出版社，2007

附錄

期中審查意見回覆表

委員意見	意見回覆
<p>1. 第 15 頁倒數第 3 行，起「使」風速應為起「始」風速。</p> <p>2. 風力發電機實場量測平台中，風速計及小型風力發電機設置在建築物頂部不同角落，在分析上是否會造成不一致性？</p> <p>3. 本研究之成果將可提供國內小型風力發電機廠商設計及認證之平台，得以提昇本風洞實驗室之服務水準與能量。</p> <p>4. 風力發電機之應用研究需求與日俱增，國外已有超大型風力發電機之應用。反觀國內之環境，小型風力發電機之發展可能有其優勢。貴所已於 97 年度完成一測試平台之試作。本計畫為後續之研究，仍須建立風力發電機平台，並進行長時間實場量測再與風洞實驗結果進行比對等工作，初步結論宜將風洞試驗與現場量測結果以圖表比較之。</p> <p>5. power(w)名為發電效能，而圖</p>	<p>1. 將於期末報告中訂正。</p> <p>2. 已於風力機北側增設一台風速計，同時擷取兩台風力計風速資料。</p> <p>3. 感謝委員的肯定。</p> <p>4. 將會累積較多數據資料進行比較。</p> <p>5. 將於期末報告改正。</p> <p>6. 將於期末報告改正。</p>

<p>4-4、4-5 之 power 名為功率(或發電功率)，名稱請一致化。</p> <p>6. 文章撰寫應有層次，而章節之頁首文字請一致。</p>	
--	--

期末審查意見回覆表

委員意見	意見回覆
<p>1. 本計劃為 97 年度計劃之延續性研究，以小型風力發電機(Hi Enegy DS200 型)於風洞實驗室頂樓及風洞中進行風速、耗電效率等之量測，已有一定之成果。</p> <p>2. 表 5-1 為本計劃重要之成果之一，建議加註說明實場量測結果數據皆小於風洞實驗結果之主因，即於第五章文中討論以摘要方式加註。</p> <p>3. 是否可將試驗場所增列到其他地區，以作為商業化及使用。</p> <p>4. 繼續作實地調查研究，以達測試標準</p> <p>5. 高風速的變異係數甚大，是否影響成果的精確性。</p> <p>6. 本次使用的風機雖因風災影響數據不多，仍可考慮配合氣象資料推估本風機一年中可帶來多少的經濟效益</p>	<p>1.感謝委員支持</p> <p>2.於成果報告中修正</p> <p>3.未來將列入考量。</p> <p>4. 未來將列入考量。</p> <p>5.將累積更多數據進行評估報告。</p> <p>6.將累積更多數據進行評估報告。</p>