

# 小型風力機系統開發

## The development and design of small wind turbine

作者 1.林榮貴 工研院機械所 工程師  
2.王彥傑 工研院機械所 副工程師 3. 張永源 工研院機械所 經理  
\* 投稿「機械工業」 \* 本文為「自撰」  
\* 關鍵字：小型風力發電機、開發、測試、驗證

### 摘要

風力發電機為長壽命的產品，小型風力發電機其技術及投資門檻較低，但仍其需要非常高的可靠度系統開發設計與建置。本文風力發電機小型風力發電機系統開發，乃依小型風力發電機相關標準與規範如 IEC、GL、AWEA 等相關規定與實際投入經驗來進行系統開發。其內容包含小型風力發電機簡介、小型風力發電機系統設計、小型風力發電機系統設計推展、小型風力發電機系統測試及驗證等。

The wind turbine is a reliable product. The level of technology and investment for small wind turbine are low or less, but they also shall be designed and established very reliable. This article which the development and design of small wind turbine refer to the related standards and regulations of small wind turbine as IEC, GL, AWEA, etc., also refer by physical experiments of development and design for small wind turbine. This development and design of small wind turbine include introduction of small wind turbine, system design of small wind turbine, the development of system design for small wind turbine and the test and certification of system design for small wind turbine.

### 前言

世界上的原油等能源正在快速減少當中，風力發電為一綠色環保的新興能源。全世界風力發電累計裝置量持續成長，最近 2~3 年市場呈爆炸性成長；2008 年全世界小型風力發電機銷售成長 53% (資料來源: AWEA, 2009)，未來商機前景相當看好，其系統開發設計與建置更是相當重要的一環。本系統開發參考了國際相關規範如 IEC、GL、AWEA 等相關規定與實際投入經驗來進行系統開發。其內容包含小型風力發電機簡介、小型風力發電機系統設計、小型風力發電機系統設計推展、小型風力發電機系統測試及驗證等。

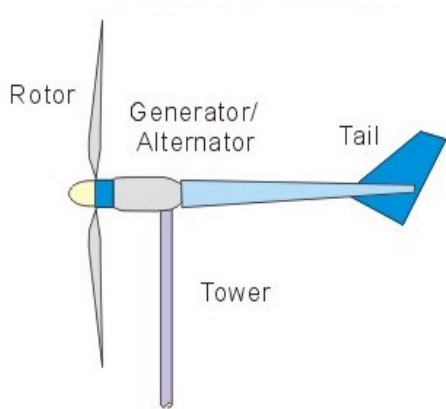
### 小型風力發電機簡介

小型風力發電機(Small Wind Turbine)之定義，說法各有不同。依國際電工委員會 IEC61400-2 小型風力發電機設計規範之定義，為風力發電機之轉子掃掠面積小於 200m<sup>2</sup> 且其產生電壓小於 1,000V a.c. 或 1,500V d.c.。依美國風能協會(AWEA)之定義，小型風力發電機產生額定功率 100kW 為小型風力發電機(Small Wind Turbine)；小型風力發電機產生額定功率 1kW 為微型風力發電機(Micro Wind Turbine)。依英國風能協會(BWEA)之定義，小型風力發電機產生額定功率 100W~ 50kW 為小型風力發電機(Small Wind Turbine)；小型風力發電機產生額定功率 < 100W 為微型風力發電機(Micro Wind Turbine)。

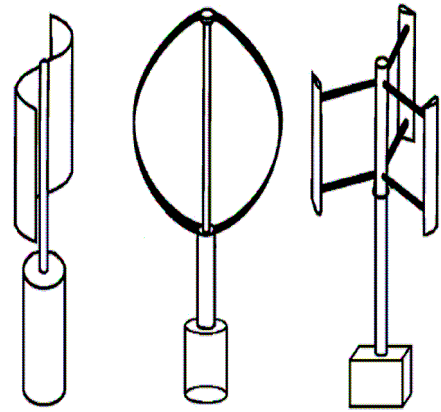
依美國風能協會(AWEA) 2009 年之美國小型風力發電機市場統計顯示，< 1kW 機種皆為離網型(Off-Grid)；1kW~ 10kW 為離網型或併網型(On-Grid)；> 11kW 機種皆為併網型。

小型風力發電機主要有水平軸式(Horizontal Axis)及垂直軸式(Vertical Axis)發電機兩種。目前風力動力傳動方式，大都採用直驅式傳動方式；其透過風吹轉動葉片(Rotor blade)而直接帶動發

電機(Generator)發電。透過電力轉換、最大功率及安全控制、電網連結或儲能最佳調控等技術手段，搭配競爭力及商機規劃佈局，必能創造發展再生能源與推動產業之雙贏實機。水平軸式小型風力發電機示意圖如圖一。垂直軸式小型風力發電機示意圖如圖二。



圖一 水平軸式小型風力發電機示意圖



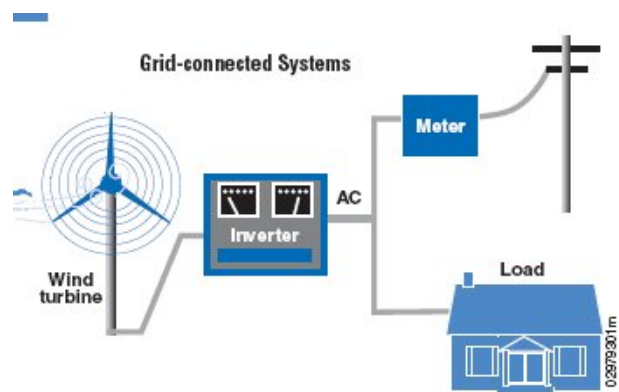
圖二 垂直軸式小型風力發電機示意圖

風力發電機之風力發電原理，乃由風能(Wind energy)風吹葉片而轉動轉子(Rotor)主軸產生機械能(Mechanical energy)，轉子主軸再帶動發電機發電產生電能(Electrical energy)，然後透過電力轉換而電網連結或儲能最佳調控方式有效運用其電能；風力發電機由風能轉換為機械能再轉換為電能，其轉換過程必有能量損失而有轉換效率問題如圖三、圖四。

$$P_{WEA} = P_{wind} \cdot c_{p, Betz} \cdot \eta_{Rotor} \cdot \eta_{Getriebe} \cdot \eta_{Generator} \cdot \eta_{Elektronik}$$

資料來源：INENSUS

圖三 小型風力發電機風力發電轉換效率



資料來源：AWEA

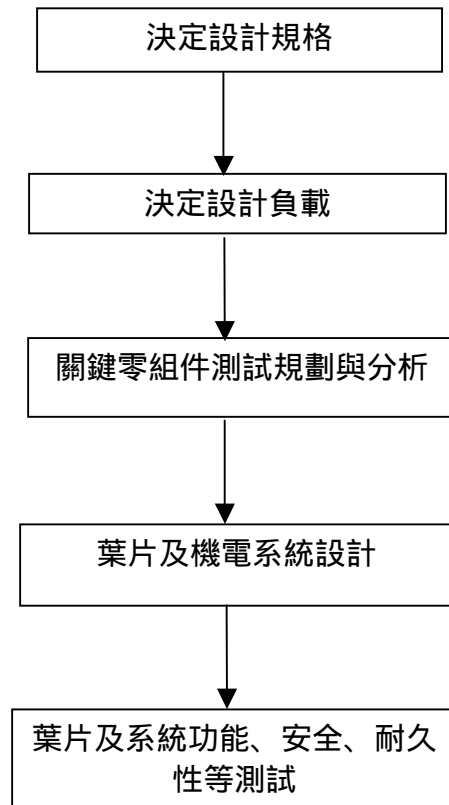
圖四 小型風力發電機併網型系統圖

小型風力發電機風力發電轉換效率，有風能( $c_{p, Betz}$ )、機械能( $\eta_{Rotor} \cdot \eta_{Gear}$ )及電能( $\eta_{Gene} \cdot \eta_{Electrical}$ )轉換效率，其最終風力發電轉換效率為各轉換效率之乘積，將最終風力發電轉換效率再乘以理論風力發電功率( $P_{WIND}$ )即為最終實際產生風力發電功率( $P_{WEA}$ )。依德國空氣動力學專家 Albert Betz 研究得出，風力發電最佳風能轉換效率為 59.3%；依 Paul Gipe 研究得出，機械能及電能轉換效率均大於 90%，小型風力發電機其最終實際產生風力發電功率，通常會小於 30%；另小型風力發電機理論風力發電功率，依動力學原理得出  $P_{WIND} = 1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$ ，其中  $\rho$  為空氣密度(一般以  $1.225 \text{ kg/m}^3$  計)， $A$  為掃掠面積(Swept area,  $\text{m}^2$ )， $V$  為額定風速(Rated wind speed,  $\text{m/s}^2$ )。

小型風力發電機之整體設計關鍵之處，在於市場商機的掌握及機台功能的適切性。

## 小型風力發電機系統設計

小型風力發電機系統設計，依 IEC61400-2 小型風力發電機設計規範規定，首先需對設計規格進行分析及決定，再對設計負載進行分析模擬及決定，之後對關鍵零組件進行測試規劃與分析，然後依前述各項分析模擬及規劃結果，考慮相關標準規範及經驗，對葉片及機電系統進行實質設計展開，設計後即依相關標準規範及設計規定進行零組件製作、組裝，最後依相關標準規範進行葉片及系統功能、安全、耐久性等測試。小型風力發電機系統設計流程圖如圖五。



圖五 小型風力發電機系統設計流程圖

決定設計規格，乃依小型風力發電機外在使用環境狀況(External condition)等級(Class)，對設計功率(design power)、設計轉速(design rotational speed)、設計軸扭力(design shaft torque)、最大轉速(Max. rotational speed)及最大轉向率(Max. yaw rate)等依設計規範進行分析及決定更細部的設計規格。小型風力發電機外在使用環境狀況等級如表 1。

SWT Class	I	II	III	IV	S
$V_{ref}$ (m/s)	50	42,5	37,5	30	Values to be specified by the designer
$V_{ave}$ (m/s)	10	8,5	7,5	6	
$I_{15}$ (-)	0,18	0,18	0,18	0,18	
$a$ (-)	2	2	2	2	
where <ul style="list-style-type: none"> <li>the values apply at hub height, and</li> <li><math>I_{15}</math> is the dimensionless characteristic value of the turbulence intensity at 15 m/s,</li> <li><math>a</math> is the dimensionless slope parameter to be used in equation (7).</li> </ul>					

資料來源：IEC 61400-2

表 1 小型風力發電機外在使用環境狀況等級表

決定設計負載，乃依簡化負載模式(Simplified load model)或氣動彈性模式(Aeroelastic modelling)或負載量測(Load measurements)等依設計規範進行分析及決定設計負載。簡化負載模式之設計負載狀況如表2。

Design situation	Load cases	Wind inflow	Type of analysis	Remarks
Power production	A Normal operation		F	
	B Yawing	$V_{hub} = V_{design}$	U	
	C Yaw error	$V_{hub} = V_{design}$	U	
	D Maximum thrust	$V_{hub} = 2,5V_{ave}$	U	Rotor spinning but could be furling or fluttering
Power production plus occurrence of fault	E Maximum rotational speed		U	
	F Short at load connection	$V_{hub} = V_{design}$	U	Maximum short-circuit generator torque
Shutdown	G Shutdown (braking)	$V_{hub} = V_{design}$	U	
Parked (idling or standstill)	H Parked wind loading	$V_{hub} = V_{e50}$	U	
Parked and fault conditions	I Parked wind loading, maximum exposure	$V_{hub} = V_{ref}$	U	Turbine is loaded with most unfavourable exposure
Transport, assembly, maintenance and repair	J To be stated by manufacturer		U	

資料來源：IEC 61400-2

表 2 簡化負載模式之設計負載狀況表

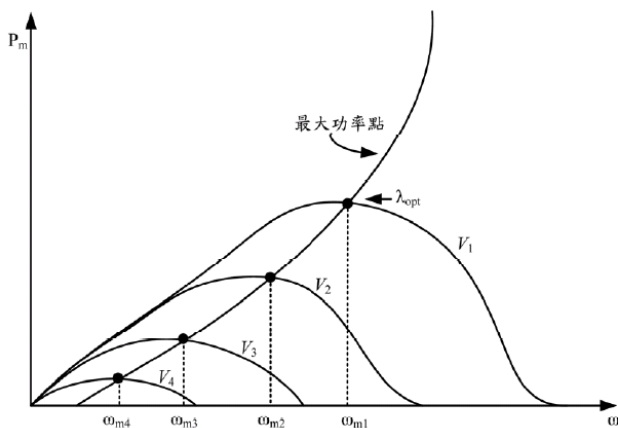
關鍵零組件測試規劃與分析，乃對葉片及系統功能、安全、耐久性測試通過所需設計進行規劃與分析。葉片測試通過所需設計，依IEC61400-23規定；系統功能及安全測試通過所需設計如功率及轉速控制、轉向控制、過速保護、緊急停機等；耐久性測試通過所需設計如可靠度操作、至少2,500小時發電能力等。

葉片及機電系統設計，乃依所決定之設計規格、設計負載、關鍵零組件測試規劃與分析及相關標準規範及設計經驗，對葉片及機電系統進行實質設計展開。

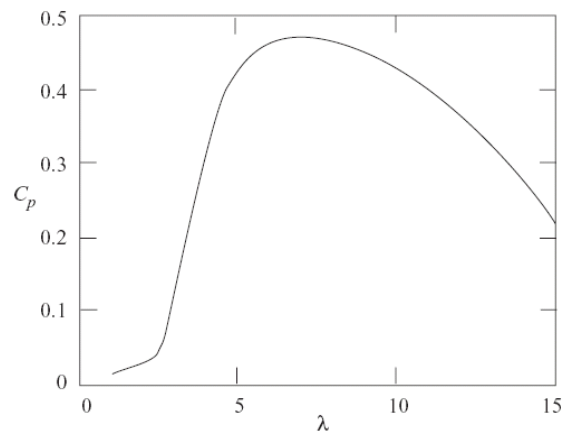
## 小型風力發電機系統設計推展

小型風力發電機系統設計推展，從設計及實務兩方面來推展，兼顧功能、效率及商機，此需有各方專業技術通力合作，才会有較周延的系統設計推展。

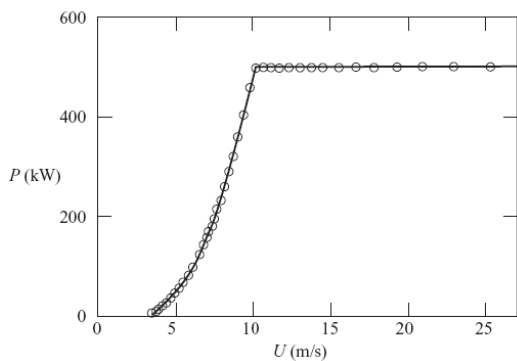
小型風力發電機系統設計方面，應考慮成本、效能、安全及可靠度。成本方面包括風力發電機製造成本、風場及安裝成本、操作及維修成本、發電能力、系統壽命(System lifetime)及保險成本等；效能方面，小型風力發電機葉片與發電機設計的有效整合，將會產生好的小型風力發電機輸出功率( $P_m$ )、風速( $V$ )及轉子轉速( $\omega$ )關係圖如圖六；另設計推展好的小型風力發電機風能轉換係數( $C_p$ )及尖速比(Tip speed ratio,  $\lambda$ )關係圖、輸出功率( $P_m$ )及風速之功率曲線圖如圖七、圖八。



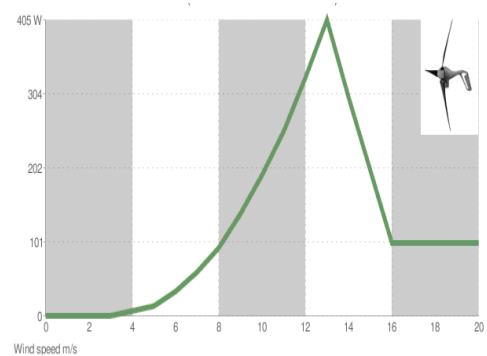
圖六 輸出功率( $P_m$ )、風速( $V$ )及轉子轉速( $\omega$ )關係圖



圖七 風能轉換係數( $C_p$ )及尖速比( $\lambda$ )關係圖



圖八 輸出功率( $P$ )及風速之功率曲線圖



圖九 輸出功率及風速之功率曲線圖

好的小型風力發電機輸出功率( $P_m$ )、風速( $V$ )及轉子轉速( $\omega$ )關係圖如圖六，當小型風力發電機葉片與發電機設計的有效整合，即會產生在不同風速下的  $P$ - $\omega$  關係圖；風速變化時，如須獲得最大輸出功率( $P_{MAX}$ )，則須調整控制轉子轉速( $\omega$ ，即發電機轉速)使得發電機輸出功率最大化，故須採用具最大輸出功率(MPPT)之變速控制系統。以 1kW 小型風力發電機為例說明，當風速  $V_4=3\text{m/s}$  時， $P_{MAX4}=20\text{W}$  之  $\omega_4=108\text{rpm}$ ； $V_3=7\text{m/s}$  時， $P_{MAX3}=258\text{W}$  之  $\omega_3=253\text{rpm}$ ； $V_2=11\text{m/s}$  時， $P_{MAX2}=1\text{kW}$  之  $\omega_2=398\text{rpm}$ ； $V_1=15\text{m/s}$  時， $P_{MAX1}=1.5\text{kW}$  之  $\omega_1=398\text{rpm}$ 。

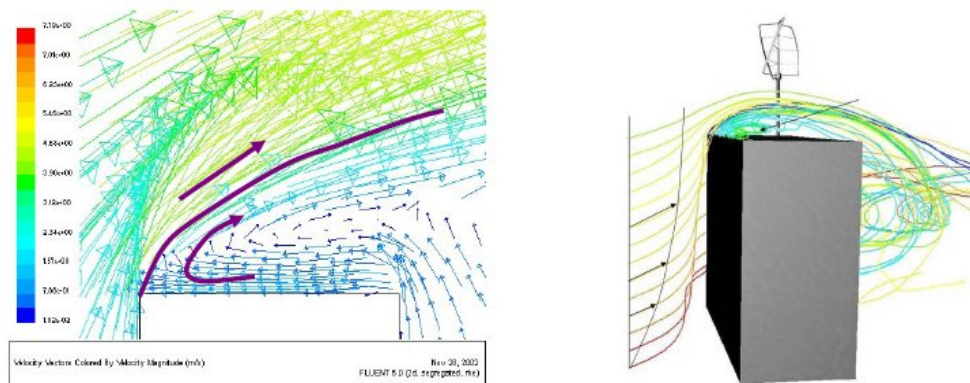
有些功率曲線圖仍有待深入了解，如圖九中表示功率對風速的性能曲線，額定風速之前

隨著風速增加功率跟著增加當到額定風速有 400W 的輸出，但仔細觀察 400W 的風力機在 90% 以上的風速範圍並不能達到額定的輸出，尤其在超過額定風速條件下的輸出功率反而減少功率的輸出，由於可能為廠商的設計安全考量或者成本考量下的結果，但是往往會誤導消費者的期待。

小型風力發電機在系統壽命(System lifetime)期間內建置成本，通常包含發電機製造成本(Machine, 約佔 55%)、風場及安裝成本(Site, 約佔 20%)及操作維修成本(Q&M, 約佔 25%)。風場及安裝成本包含風場、地基(Foundation)、建置允收(Erection and commissioning)、併網連結(Grid connection)、財務借款利息(Financing)、規劃工程(Planning and engineering)、運輸(Transport)及遙控監控(Remote monitoring)；操作維修成本包含操作維修、土地租用(Land rental)、保險(Insurance)、計畫管理(Project management)。其實際成本結構，將依實際配置需要而調整。

小型風力發電機與公共建築或建物整合應用機種，通常為 1~20kW 規格；小型風力發電機大多安裝於建築頂面或地面建築附近。水平軸式小型風力發電機適合整合應用於風況良好穩定、障礙物少之建築，其風力發電效能較高，但產生噪音較大；垂直軸式小型風力發電機適合整合應用於風況較差較不穩定、障礙物多之建築，其風力發電效能較低，但產生噪音較小。

目前小型風力發電機與公共建築或建物整合應用機種，屬尚待發展改進型態。在建造成本方面，約 10~40 萬元/kW (風光互補型約 30 萬元/kW )成本過高；在效能方面，平均風速 5.5m/s 下為 150~400kWh/m<sup>2</sup>/year 遠較大型風力機(800~1200kWh/m<sup>2</sup>/year)差。國際上，此機種研發、技術發展應用及驗證等資訊，仍普遍不足。然而英國與荷蘭在此機種著力已有一段時日，至 2006 統計為止，荷蘭已建置 56 台，英國亦已建置 150 台，積極發展改進當中如圖十。

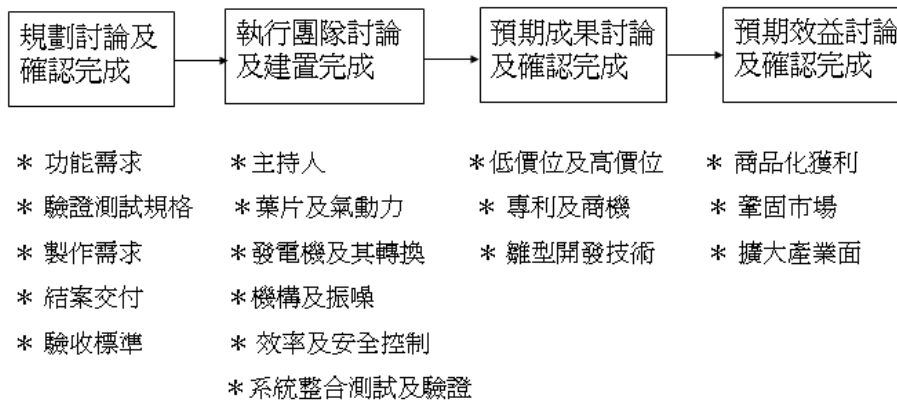


資料來源：AWEA

圖十 小型風力發電機與建築整合應用之風力流場示意圖

小型風力發電機系統設計推展，實務方面需透過功能需求、驗證測試規格、製作需求、結案交付、驗收標準之規劃及各專業如葉片及氣動力、發電機及其轉換、機構及振噪、效率及安全控制、系統整合測試及驗證之技術整合，才能發展出具競爭力的利基產品如圖十一。

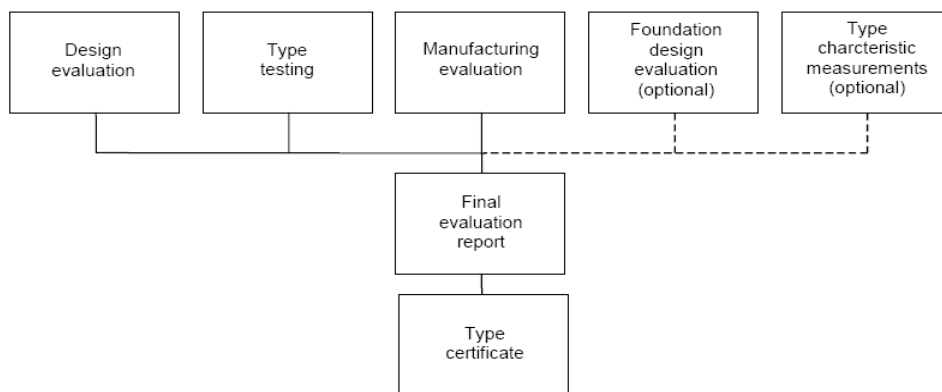




圖十一 小型風力發電機系統設計推展

## 小型風力發電機系統測試及驗證

小型風力發電機系統驗證，在歐美市場等大多數地區，如無法通過國際標準規範 IEC 等所規定的驗證規範，其風力發電機是無法販賣的。依 IEC61400-2 小型風力發電機設計規範規定，其流程須先進行設計評估(design evaluation)、型式測試(type testing)、製造評估(manufacturing evaluation)、基礎設計評估(選項)(foundation design evaluation)(optional)及型式特性量測(選項) (type characteristic measurements)(optional)，之後進行最終評估報告(final evaluation report)最後即進行型式驗證如圖十二。

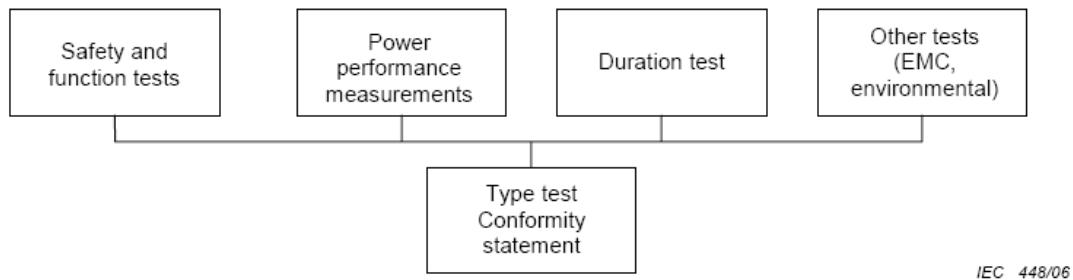


IEC 446/06

資料來源：IEC 61400-2

圖十二 小型風力發電機系統型式驗證流程圖

小型風力發電機系統型式測試，為驗證不可或缺的必要條件；其包含安全及功能測試(safety and function tests)、功率性能量測(power performance measurements)、耐久性測試(duration test)及其他測試(EMC, environmental)如圖十三。



資料來源：IEC 61400-2

圖十三 小型風力發電機系統型式測試流程圖

安全性與功能系統測試主要包含功率與速度控制、迎風轉向控制、電網斷網行為、超速保護、啟動與關機、緊急停機操作等測試；耐久性測試主要包含可靠度操作、6 個月操作、任何風速下 2,500 小時功率輸出 1.2 平均風速下 250 小時功率輸出及 1.8 平均風速下 25 小時功率輸出

## 結論

世界上的原油等能源正在快速減少當中，風力發電為一綠色環保的新興能源。全世界風力發電累計裝置量持續成長，未來商機前景相當看好；小型風力發電機其技術及投資門檻較低，極適合台灣產業投入發展，但仍其需要有周延的開發設計與建置。國際標準規範 IEC、GL、AWEA 等相關規範對小型風力發電機已訂定完整的驗證規範；在歐美市場等大多數地區，如無法通過國際標準規範 IEC 等所規定的驗證規範，其風力發電機是無法販賣的。

故小型風力發電機系統開發，須依循國際標準等規範及配合實務商機需要而推展。市場商機的掌握及機台功能的適切性，如何透過規劃、專業團隊運作及成果效益規劃，持續累積專業實力及經驗，發展出具競爭力的小型風力發電機系統開發，是相當重要的一環。



## 參考資料

- [1] AWEA, AWEA small wind turbine global market study,2009.
- [2] IEC 61400-2, Design requirements for small wind turbines,2006.
- [3] AWEA, AWEA small wind turbine global market study,2008.
- [4] BWEA, Small wind technologies,2009.
- [5] Robert Harrison, large wind turbine,2000.
- [6] Tony burton, wind energy handbook,2001.
- [7] IEC TS61400-22, The new standard for Wind Turbines and Wind Farms – Onshore and Offshore, 2008
- [8] Germanischer Lloyd, Guideline for the certification of wind turbine,2003.
- [9] INENSUS, Technologies of Small wind turbine,2009.
- [10] Paul Gipe, Wind power,2004.
- [11] AWEA, Guideline for small wind turbine in the built environment,2007.
- [12] AWEA, Small wind electric systems,2008.