

多自由度硬體 在環風力機 測試平台介紹

文/張永源、桂人傑

關鍵字：風力發電機、機艙測試平台、硬體在環、多自由度、傳動鏈/功率鏈。

風力機可靠度為風電場開發設置最為關鍵要求，尤其在離岸風電場要求更高。為了改善風力發電機之運轉可靠度，全球各主要國家持續投入許多心力於地面測試驗證之方式。本文介紹已漸成全球產品測試主流的多自由度硬體在環之風力機測試平台，可模擬風力機實際承受之各種可能負載狀況，以縮短其風力機研發修改及測試驗證的時間與成本，提供給國內業者於投入離岸風力機研發之參考。

前言

過去20年來，全球風力發電市場持續穩定成長，至2014年為止，全球已累計安裝之風力機總裝置容量約370GW，其中離岸風力為8.7GW。2014年風力發電佔全球電力需求之5%，已成為各先進國家主要電力來源之一，其中丹麥的風力發電更佔其國內電力需求之39%。

風力發電機於運轉期間承受到隨機且變動的風力負載，設計時除了需考量此項變動負載外，對於風力發電機之起動、運轉、空轉、併網、離網、關機、緊急剎車、停機及運送等各種狀況亦需進行設計與模擬分析，且風力發電需符合於電網故障發生時，有足夠電網支撐能力，如此方能符合風力機之高可靠度、高系統效能及低能源成本之要求。而此種風力發電設計要求，使得風力發電(尤其離岸風電)技術的發展變得更為複雜，且於風力發電於設置佈署前面臨更多挑戰。

歐美等風力發電技術先進國家，在開發離岸風力機流程中，通常其雛型機

要先在陸域通過至少1~2年的測試，然後才安裝到海上進行測試，但由於可測試之時間視窗(time windows)及完成時程難以掌握，且未必能涵蓋足夠的負載狀況，再加上海上測試與修改的作業成本極高，因此如何能在陸上執行完成所需之加載測試形成一個技術挑戰。

參考航太及車輛工業的經驗，建造可模擬多種負載荷狀況的大型多自由度之傳動鏈測試台，使離岸風力機的功率鏈(或機艙總成)先在陸上實驗室中以硬體在環(Hardware in the Loop, HIL)方式進行加載及壽命測試(life testing)，以確保離岸風力機之性能及可靠度，已在歐美逐漸形成共識。

本文介紹全球先進國家積極推動多自由度硬體在環測試平台之發展現況，提供給國內有興趣投入離岸風力機系統設備研發的相關產學研單位之參考。

風力機承受負載之複雜性

風力機設置環境比一般產業設備惡劣，其所承受之負載類型相當複雜，

爲了滿足風力機結構完整性(Structural Integrity)之安全要求，國際標準機構(國際電工委員會IEC)編修泛用於國際間之設計指南及設計標準(IEC-61400標準系列)，依據風電運行之經驗、實驗、以及學理，並採用統計方式，制訂出風力機在設計時階段必須參照使用的多種設計情境(design situation)中之負載工況，即設計負載工況(Design Load Cases: DLCs)，吾人在概念上可將DLCs理解爲是系統商在設計風力機時必須求解及過關之標準題庫。

設計情境基本上是涵蓋風力機自出廠至運行所經歷或面臨之主要情境，包括(1)發電、未發電(含停止及怠轉)等常態性情境；(2)開機、停機、故障等短暫

性情境；以及(3)運輸、架設、維護等有工作團隊介入時之情境，若處於寒帶地區尚必須考慮(4)結冰之情境。

設計負載工況是人爲擬想在設計情境之下各種可能對風力機造成負載效應或衝擊的狀況，其中有些屬顯而易見，有些係推導自統計數據或機率分布模型(如50年一遇之3秒極限陣風)，有些則係出於假設(如極端運轉陣風之輪廓)，以包絡高強度的風況來確保風力機的運轉耐受能力。可想而知，基於安全及確保結構完整性之要求，設計負載工況在制定時，是經過詳細而深入地全面性檢視。圖1是針對離岸風力機羅列了其可能承受之環境衝擊與負載，相較於陸域風力機需承受主要源自於入流

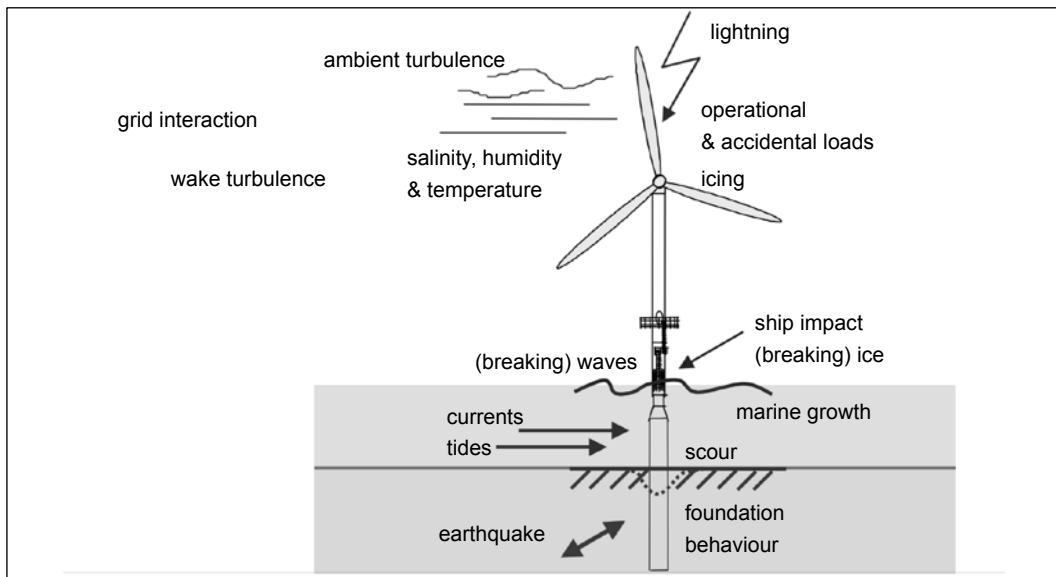


圖1 離岸風力機承受之環境衝擊與負載[1]

風(inflow wind)對葉片產生之氣動力負載(aerodynamic loading)，通常可參照標準風級(wind class)來設定設計之輸入條件，離岸風力機則還要考慮波浪、海流所產生之水動力負載(hydrodynamic loading)，以及海床地質之影響(因一個離岸風電場若涵蓋變異極大的海床地質，其離岸風力機將需要不止一種的支撐機構設計或海事施工作業方式)，而在寒帶地區上尚包括結冰的情形，這些都是屬於必須因地制宜的設計輸入條件，就設計輸入之參照性而言，和陸域風力機可挑選標準風級之作法是不相同的，因而設計上所面臨的負載複雜性及困難程度亦提高極多。

風力機測試驗證的挑戰

遵循設計指南或設計標準的風力機，在其設計上必須可以承受設計負載工況之極限負載或疲勞負載，且維持結構完整性，因此在風力機開發過程中，一方面，系統商必須經過繁複而嚴謹的計算分析與設計流程，以提出可符合設計指南或設計標準之設計，而另一方面，基於大型風力機需扮演常規發電設備角色之趨勢，以及風電場開發計畫需取得金融機構的融資和保險，系統商通常須委託認證機構(certification body)來執行風力機的型式認證(type certification)，以取得型式認證之證書

(type certificate)來滿足上述兩大需求，並將此證書做為切進風電市場之入場券。

型式認證中最重要的必要模組是設計評估與型式試驗。設計評估(含設計基準評估)是針對風力機之設計基準、外部環境條件與設計負載工況、控制與安全系統、分析計算、組件測試(報告)、以及設計圖面與相關作業手冊進行檢查及評估，大部分是以書面審查為主。至於型式試驗則是對風力機的功能與安全進行把關的測試驗證，主要包括離型機系統部分的安全與功能試驗、功率性能量測、負載量測，以及組件部分的葉片測試、齒輪箱測試(若風力機具備主齒輪箱)，而選項部分則包括噪音測試、電力品質測試等。

此處必須指出的是，雖然型式試驗有其一套嚴謹的要求及標準作業流程，但其目的是針對風力機的功能及安全進行驗證以及把關，因此如果就系統的設計vs. 驗證角度來看，型式試驗其實是屬於基本必要之測試，卻未必可以視為充分之測試，茲以圖2之一般大型系統開發的模型V model來檢視，簡要說明就驗證確認之目的而言，型式試驗為“必要但不充足”之原因及情況說明如下：

1. 在型式試驗之安全與功能試驗、功率性能量測、負載量測中，僅負載量測可以觀察風力機的負載效應(load effect)及加載響應(loading response)。唯基於現實或型式認證時程的考慮，

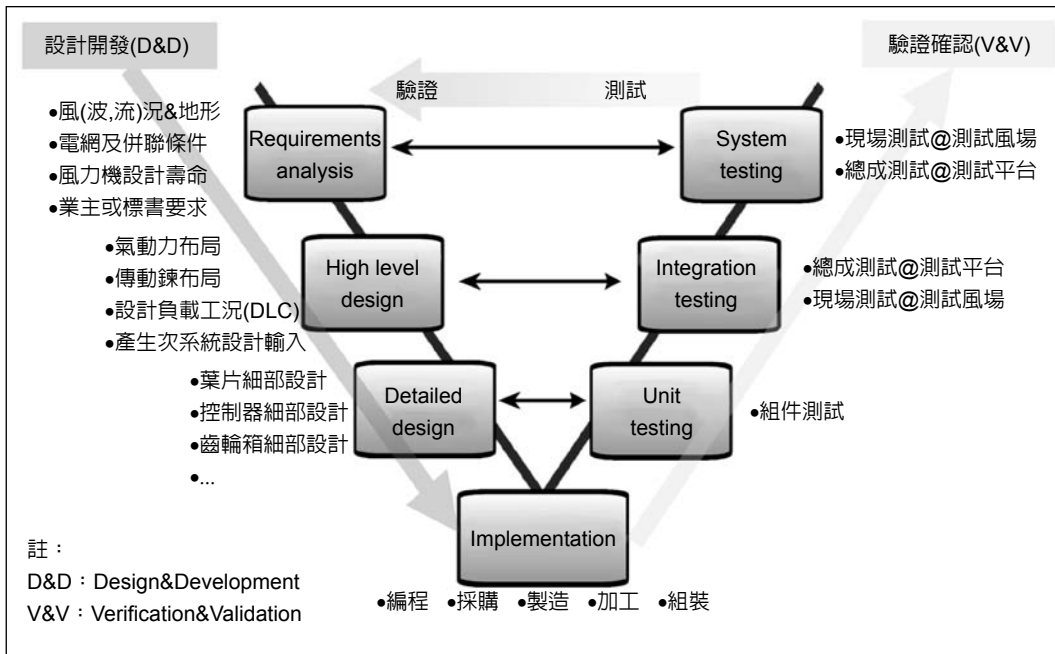


圖2 以V model呈現風力機系統之開發流程

執行負載量測的時間通常為半年或至多不超過一年，測試場地則為陸上但鄰海之合格測試場；由於在量測階段取得之負載數據在統計上是隨機性的，而機組所承受之負載與設計負載工況以及與未來實際安裝之風電場在特徵上幾乎毫無相關性，因此，設計階段的設定條件及計算結果，特別是極端條件，通常無法藉由負載量測試而得到充分的驗證及確認。

2. 大型風力機的設備壽命，涉及業主經營風電場之運維成本及內部投資報酬率，因此是業主最關切的事項之一；而雖然在不少的製造業或工程業中，

都已經採用壽命測試(life test)或耐久性測試(endurance test)的方法來驗證其設計，但大型風力機的型式試驗並未涵蓋及此(相對而言，小風力機在IEC 61400-2中則有耐久性測試)。大型風力機設計壽命至少為20年，若無法對其進行具體測試與驗證，系統商亦將無從對其設計及零組件規格進行回饋與修正。

依據歐洲風力機多年運轉經驗，技術較為成熟的齒輪箱式傳動結構之風力機系統，其故障頻率比無齒輪箱之直驅式傳動結構風力機系統低(如圖3所示)，且電力系統元件故障頻率較高，齒輪箱

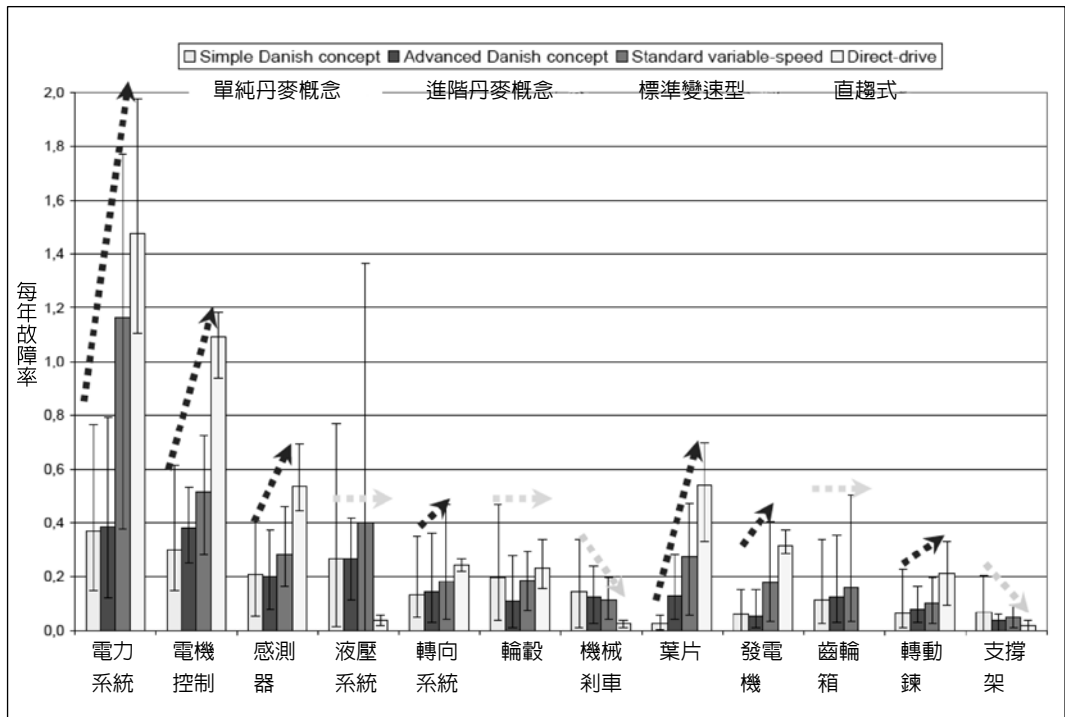


圖3 先進國家風力機運轉故障資訊[2]

及傳動系統故障頻率較低。但電力系統故障造成停機時間(down time)較短，而齒輪箱、發電機等傳動系統故障頻率雖較低，但造成停機時間長，尤其齒輪箱所造成之停機時間最長。依其研究報告顯示，前75%故障率近造成5%之停機時間，但其他25%故障率卻造成高達95%之停機時間。(如圖4所示)。

大型風力機的可用率雖然已逐漸提昇，但由上述故障統計數據可看出其故障頻率仍有待降低，而由傳動系統與電力系統所構成之功率鏈(power-train)則對風力機可靠度影響最大。一旦離岸風

電場的風力機出現故障事件，除了海事作業的運輸及吊裝成本遠高於陸域外，可允許作業的海氣象及可動復員的船隻較不易掌握亦極易拉長停機期間，使得離岸風電的運維及發電成本居高不下，因此離岸風電場業主對風力機系統商所要求的產品保證責任有明顯上揚之趨勢，如保固期由3年提高為5年，而大型(>150MW)離岸風電場潛在賠償責任之總費用，包括風力機故障之海上吊裝檢修及停止發電之損失，動輒為上億之美金(因只要多台出現同一類型故障，則包括未故障之風力機全都需要停機檢修及/

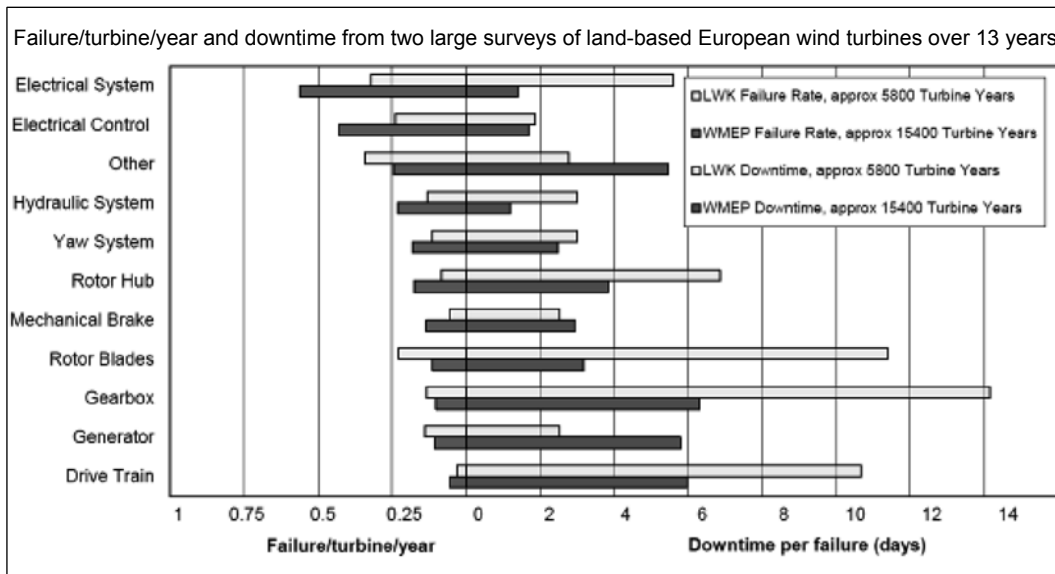


圖4 先進國家風力機故障率與造成停機時間[2]

或更換組件)，宛若不定時原子彈，即使是名列全球前沿之系統商亦難以承擔，聞之色變。面對此挑戰，提高風力機功率鏈的可靠性成爲一個關鍵任務，也成爲風電先進國家中，風電研究機構及風電業者，特別是風力機系統商的共識，因此透過建置大型多自由度的機艙測試平台來驗證及確認風力機功率鏈之設計，自2010年左右起，已如雨後春筍般在歐美風電先進國家中紛紛出籠。

全球主要多自由度硬體在環風力機傳動鏈測試平台介紹

基於風力隨時間及空間之變異性，

傳動系統除了承受帶動發電機旋轉的轉矩負載(torque load)之外，也會承受到其他自由度的非轉矩負載(non-torque load)，圖5中呈現了由葉輪傳遞到功率鏈的6個自由度的負載。圖6係風力發電機測試金字塔，風力機由材料至系統依次進行測試，唯此圖係基於產品測試之流程，其系統測試及產品現場測試與圖4係基於設計驗證流程之表示方式略有差異；圖7之美國NREL動力計執行之風力機系統測試，是在測試實驗室執行系統測試(System Test或Integrated Test)，係以傳統轉矩負載(M_{xN})來對傳動系統或機艙組成進行加載測試；至於在風電測試場豎立雛型機，對風力機系統進行現場測試(Field Test)，則以執行風力機型式試

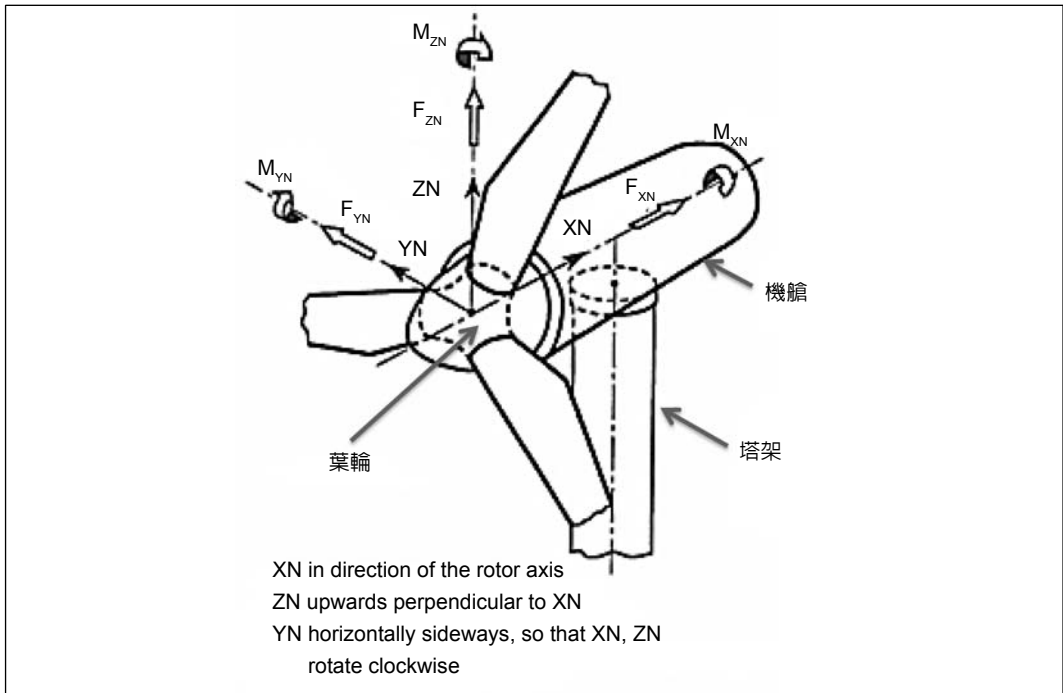


圖5 風力機承受負載6自由度示意圖[3]

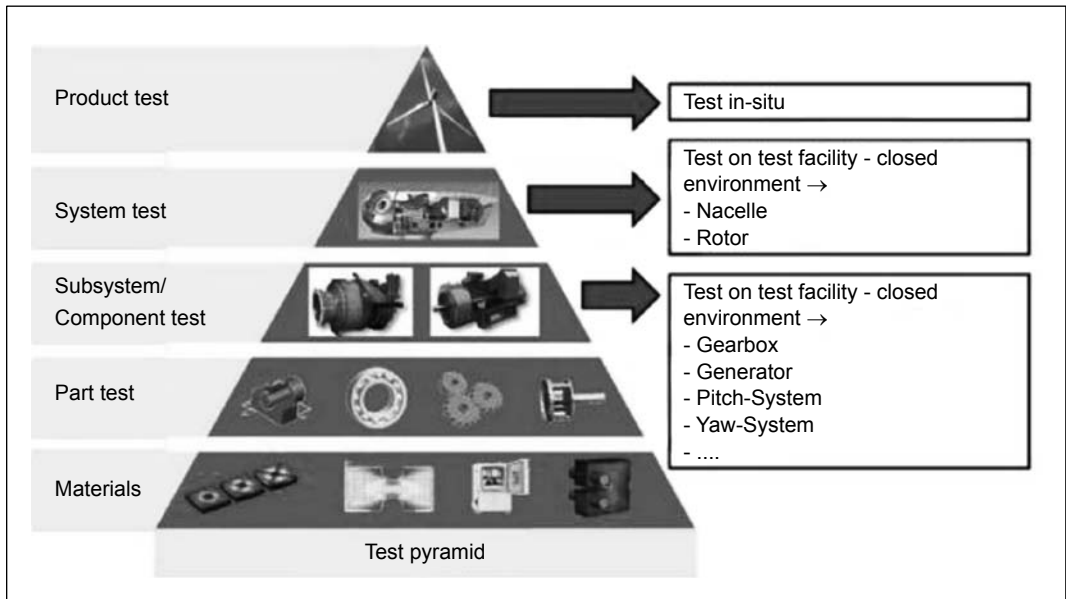


圖6 風力發電機測試金字塔[4]

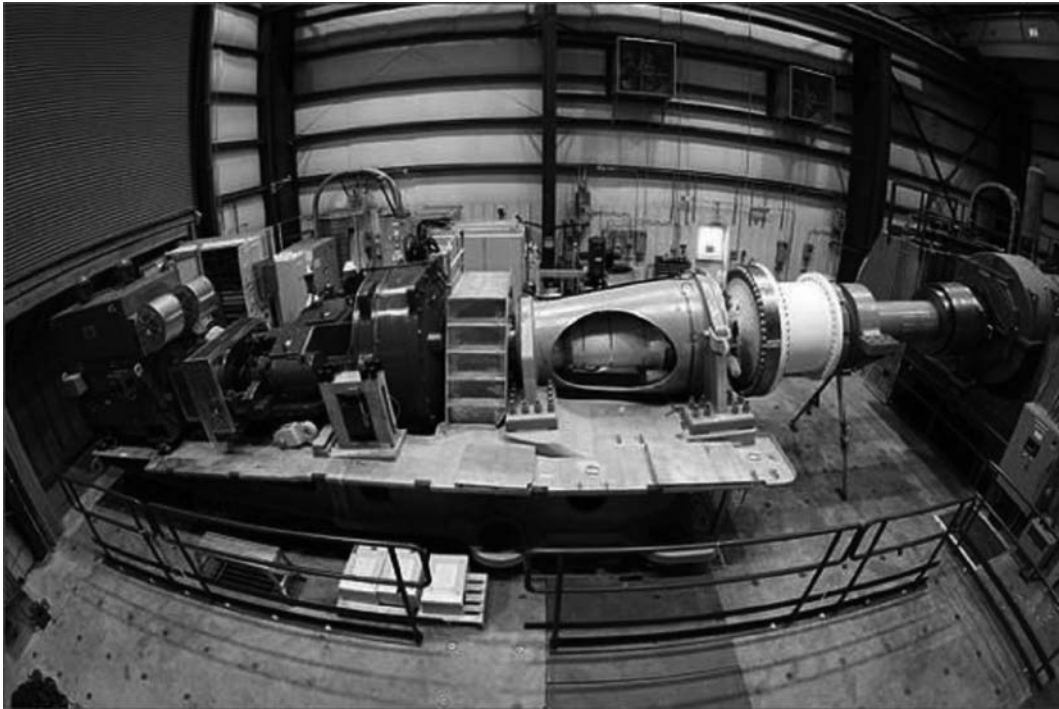


圖7 美國NREL動力計執行之風力機系統測試[5]

驗中要求之測試項目為主，**圖8**為丹麥科技大學(DTU)風電測試場為例子。

近幾年全球已有多個風電大國或大廠陸續投入或完成巨型多MW測試平台的建置，以提高其風電產品/產業之競爭力。現有或規劃中之地面測試平台主要分成兩種不同型式，一種為傳動系統測試平台(Drive train test benches)，另一種為機艙測試平台(Nacelle test benches)。傳動系統測試平台有助於測試完整風力機傳動系統於預先計算的風力負載與電網負載下之真實系統環境特性。但通常傳動系統測試平台並沒有考慮控制系統



圖8 丹麥科技大學測試場[6]

納入後對於負載之影響。相反的，**圖9**之機艙測試平台，會將控制系統納入動態硬體在環的環境影響。也就是說，機艙

測試平台需要對於量測環境及感測元件配置來進行顯著修正，可評估傳動系統各零件間之交互作用、電力系統之交互作用以及真實且可重複產生輸入測試條件之控制策略。一個完整僅少了葉輪之機艙系統是被安裝於測試平台且嵌入硬體在環系統上，可將只提供轉矩負載的傳動系統測試平台昇級為多自由度的機艙測試平台，即有機會可彌補型式試驗之不足，達成驗證功率鏈之可靠度及設計壽命之目的。

就任務需求而言，測試平台除了必須具備施加多自由度負載之能量(包括過載之能力)之外，其施加至機艙/功率鏈之負載尚必需具備足夠之動態頻寬與合理準確性，才能真正落實驗證功率

鏈之可靠度及設計壽命之目的；蓋風力機承受之主要負載雖然係源起於外部之風力，但實際之負載效應是經過與風力機的氣動力與傳動系統動態，以及風力機內部控制器的控制行為的互動而產生的，因此測試平台施加之負載還必須能快速且同時地追隨外部條件(以風力為主)以及風力機內部狀態，因此在多自由度測試平台內部需要建構(1)可補足外部輸入至功率鏈間之形成閉迴路之物理模型以及(2)可實時回饋之I/O系統，並透過高速運算來產生動態的多自由度負載命令。硬體在環(Hardware in the Loop: HIL)就是能達成這種需求的作法。

硬體在環常應用於太空、航太設備或汽車等高階之測試平台系統中，是

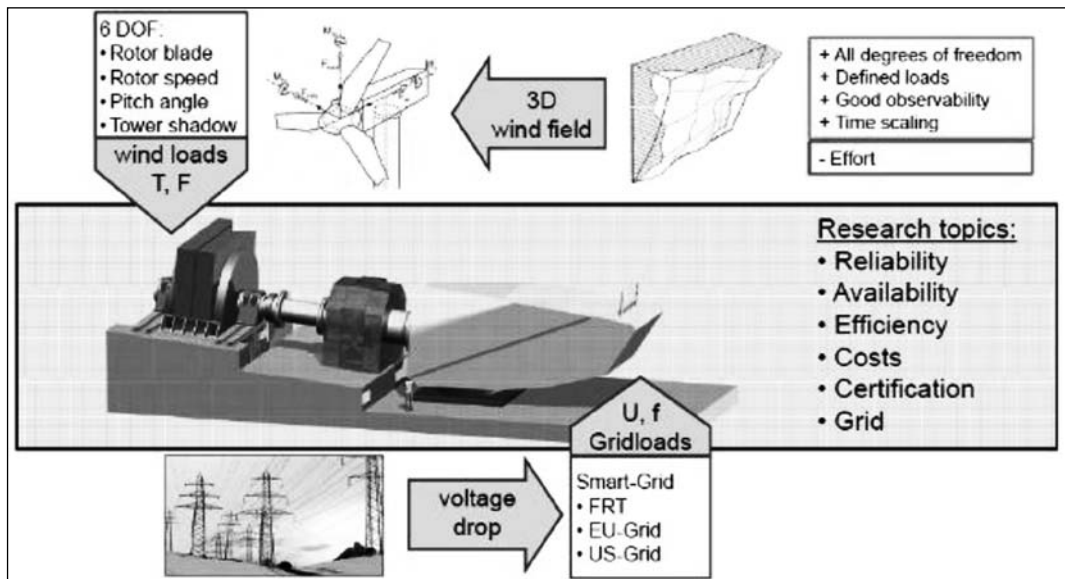


圖9 機艙/功率鏈系統測試原理[7]

針對“狀態變數(state-variables)較多並相互耦合，且內含實時控制器(real-time controller)之機械(硬體)系統”所發展的一種模擬與測試技術，其目的是在測試平台上依據狀態變數的回饋，並透過致動器來製造出仿真的外部環境，使待測系統之軟硬體能在各種仿真情境下完成完整的功能與性能之驗證。

參考圖10，硬體在環中之待測“硬體”包括機艙/功率鏈、以及控制器，後者自然內含控制軟體，前者則是由主軸、主軸承、機架、齒輪箱、聯軸器、煞車器、發電機、電力轉換器…等所構成。由於必須將外部輸入至待測硬體形

成一閉迴路，因此必須補足之物理模型的項目包括風場(wind fields，內含紊流模型、尾流模型)、葉片氣動力及結構模型(aerodynamic and structural model for turbine blade)，傳動鏈模型(drive-train model)、變槳系統模型(pitch system model)、以及感測器比擬器(emulated sensors)；這些模型都是建置於硬體在環的系統軟體之內。

一般在進行風力機硬體在環測試時，硬體在環的系統軟體會由實時接受到的風力機控制器命令及回饋信號，透過物理模型之即時演算，計算出功率鏈之負載，再經座標轉換，拆解成不同維

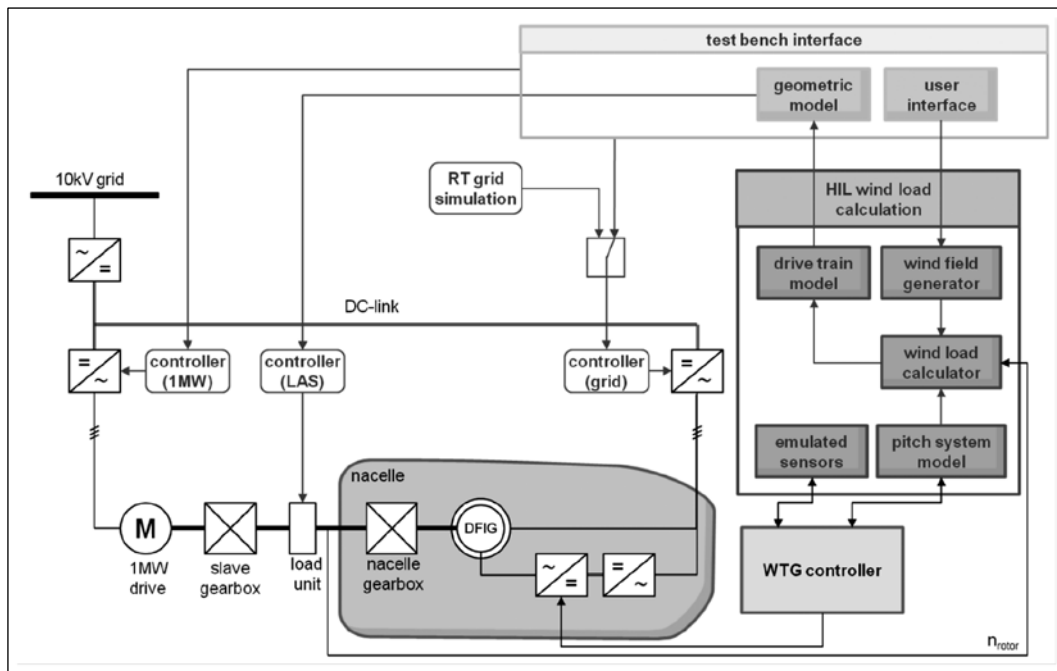


圖10 多自由度硬體在環機艙/功率鏈測試平台之控制架構[8]

度的機械負載，經由多自由度之機械加載系統施加至待測之機艙/功率鏈，另一方面也將透過感測器比擬器提供控制器所需要的回饋信號。機械加載系統通常是由一個原動機提供之轉矩負載構成一個自由度，以及一個2~5個自由度的油壓伺服系統來產生模擬的非轉矩負載。**圖11**即為一可施加5自由度非旋轉負載之油壓機構。另一方面，風力機必須將風能轉換為電能，並即時併聯輸出至電網，由於在過去10年間電網併聯法規及電力品質的要求也轉換成風力機的關鍵規格的一部分，而在型式試驗時，針對併網所能測試驗證的項目有限，且執行時間不易掌握，因此硬體在環測試平台雖然源起於機械加載的需求，但由於硬

體在環在模擬風力的部分可以充分支援併網測試，特別是電網的故障跨越(Fault Ride-Through：FRT)測試，因此電網模擬系統也成為風力機硬體在環中的另一環，而且也是風力機硬體在環所涵蓋的重要項目。

針對極端負載之測試，茲試舉例說明如次。在風力機設計標準IEC 61400-1(陸域)及IEC 61400-3(離岸)中，設計負載工況DLC6.1停止發電情境下遭遇到極端風速；DLC7.1則為發電故障情境下遭遇到極端風速。由於此二者在自然環境中的出現機率並不高，在執行期間有限的型式試驗中難以為之，因此自然不要求重現以進行驗證。但相對地，這些設計負載工況在多自由度硬體在環

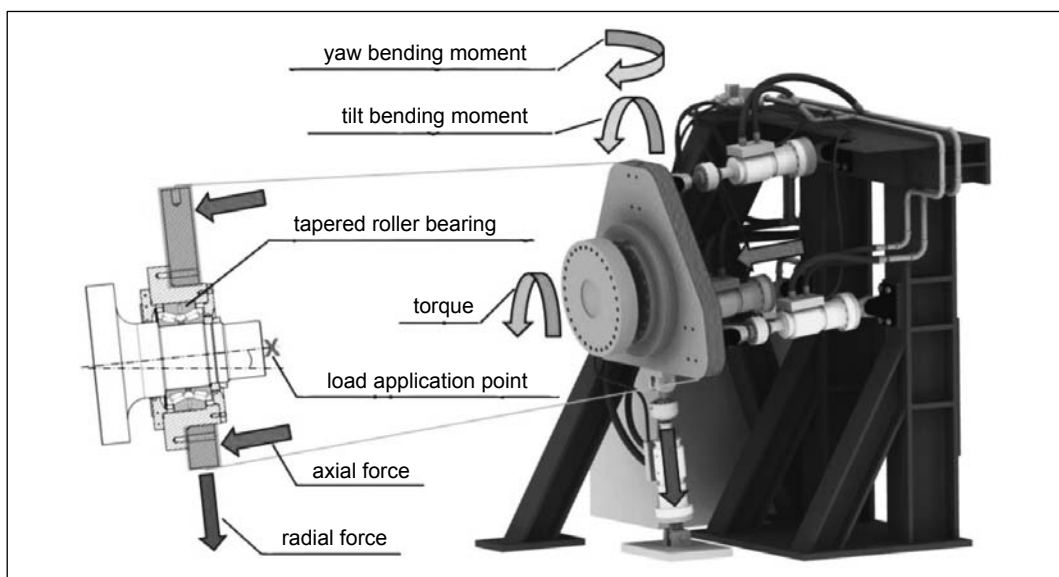


圖11 可施加非旋轉負載之油壓機構[8]

測試平台都可以進行測試及驗證，因此很容易為系統商驗證出其實際完成之風力機是否具備其設計所要求的極限強度或可靠度。事實上，短期的型式試驗不容易重現的負載狀況，在風力機實際運轉的設計壽命期間，卻可能遭遇到。如圖12所示，2008年台灣高美濕地附近[9]及2013年在日本三重縣[10]分別發生在風力機停止發電情況下，遭遇極高風速而損毀的嚴重事故，其負載工況即類似

於DLC6.1，換言之，即使取得型式試驗的符合性聲明文件，系統商在風力機極限強度部分，仍無法透過型式試驗而掌握到具有確切參考價值的量測數據。

針對壽命測試，產業界通常使用加速壽命測試(Highly Accelerated Life Test: HALT)方法，以縮短測試時間。HALT是運用加大環境應力(如溫度、濕度、6自由度振動、電源變動)即可提早誘發設計弱點，因此可放大測試期間所

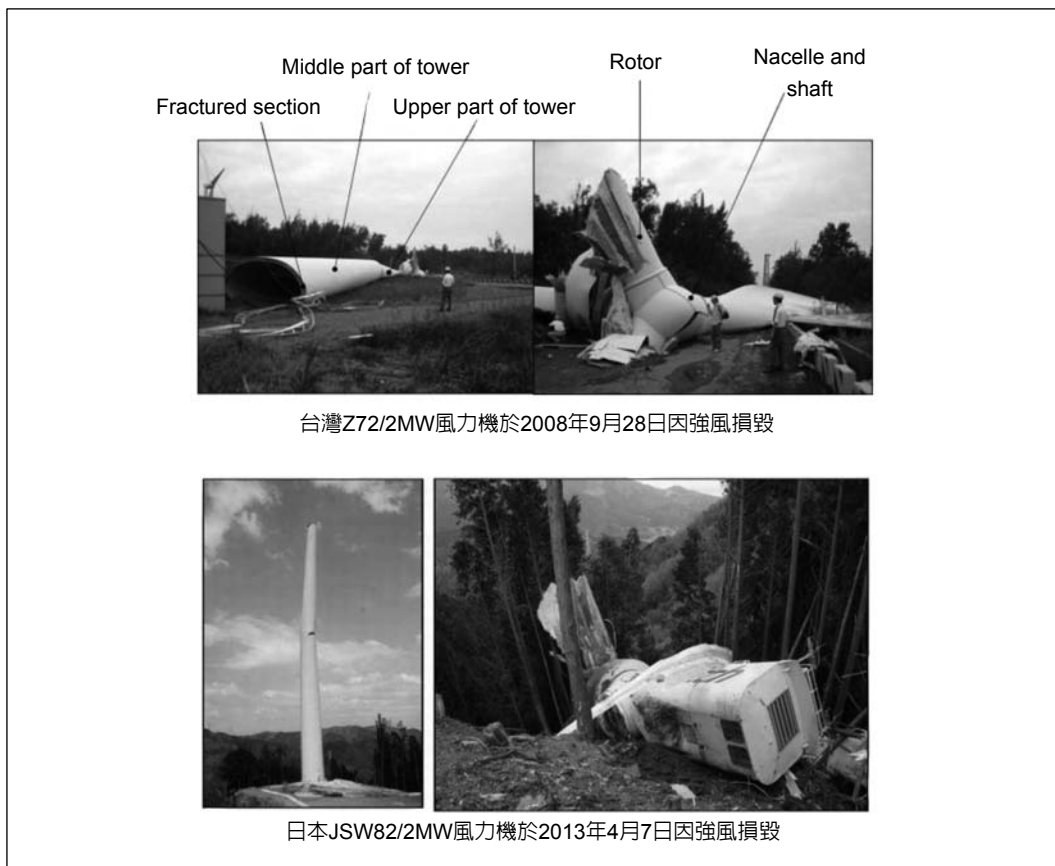


圖12 在台灣及日本皆發生在停止發電時因遭遇強風而損毀之風力機[9] [10]

代表的有效時間的理論之測試方法，在高價的民生產品或軍方的武器系統開發流程中，通常皆以必須通過HALT來做為驗證其可靠度之門檻。對離岸風力機系統商而言，HALT可以有效降低其銷售後的保固風險，因此多自由度硬體在環測試平台的主要任務之一，就是執行HALT來驗證風力機功率鏈之設計壽命。

目前全球先進國家已建造完成多個多自由度硬體在環測試平台(如表1)，其中以2013年試車，由美國政府能源部(DoE)主導支持投入逾US\$ 30M 於Clemson大學建造之15MW，6自由度為

最典型例子(如圖13)。

風力機多自由度硬體在環平台必須模擬動態負載及極端條件下之負載，不論是機械加載系統或是電網模擬系統，其額定能量必須大於待測系統的額定容量，通常是待測系統的1.5~2.5倍，因此是非常巨大而且昂貴的測試裝備，由表1可看出，除Vestas(全球最大之風力機系統廠)自建之外，其餘都是靠政府出資或贊助而興建的。由於傳統單自由度(只能提供旋轉負載)的地面測試平台在費用考量上具有優勢，但功能受到限制，因此只額外增加1~2個自由度的作法亦頗受

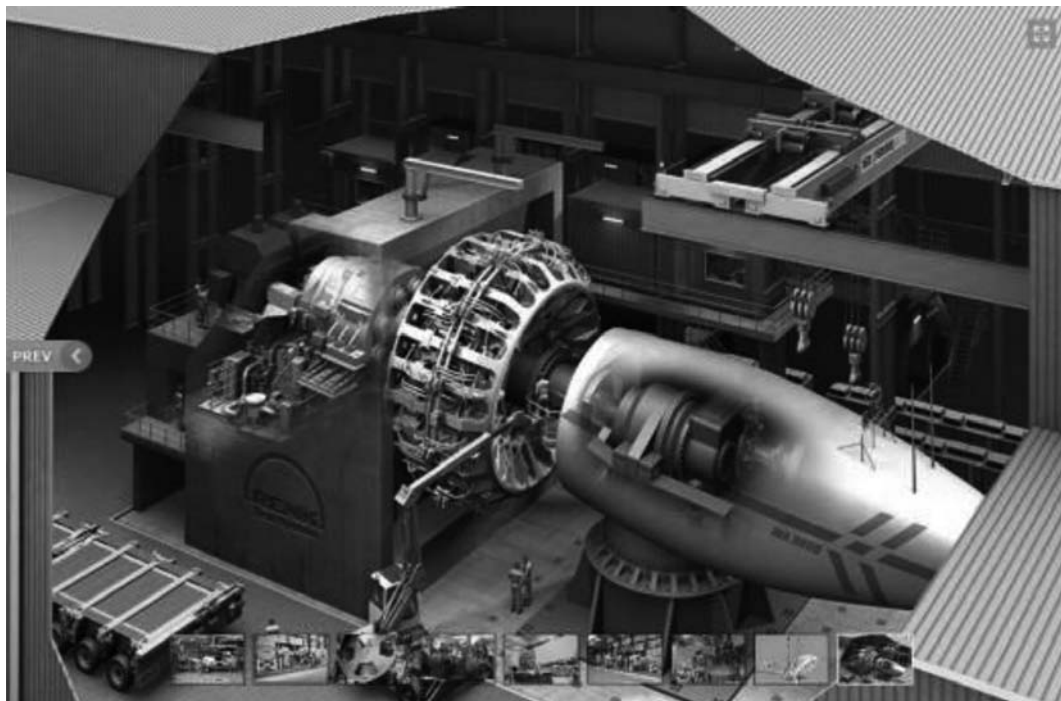


圖13 美國Clemson大學，15MW，6自由度[11]

表1 全球多自由度MW級風力機測試平台[8]

	Narec (英)		Clemson (美)		NREL (美)		LORC (丹)	Cener (西)	RWTH (德)	IWES (德)	Vestas (丹)
功率 [MW]	15	3	15	7.5	5	2.5	10	8	4	10	18
自由度	6	6	6	6	6	3	6	6	6	4	6
Tmax [MNm]	14.3	5	15	6.8	4.6	1.4	12		2.7	8.6	18
Mbmax [MNm]	56	15	50	10	7.2				7	20	
Fmax,rad [kN]	8000	4000	8000	2000	3200	440			3000		
Fmax,rad [kN]	4000	4000	4000	2000	4000	156			1500	2000	
主要經費來源	政府	政府	政府	政府	政府	政府	政府	政府	政府	政府	民間

到重視。

結論

確保離岸風力機之性能及可靠度，採用硬體在環測試平台已成為歐美廠商開發風力機設備的產品測試主流。此類多自由度測試平台除可提供傳統採用之主軸的負載轉矩之外，也提供非主軸轉矩之負載，因此能充分模擬各種風況與風力機運轉狀態組合下的負載，更可以進一步對齒輪箱、發電機、傳動鏈、機艙整成進行極端負載、疲勞負載測試，以及加速壽命測試，以縮短其風力機研發開發修改及測試驗證的時間與成本。

我國經濟部能源局積極推動離岸風力發電之開發設置，並已將國內2030年設置目標政策從原來3000MW提高至4000MW，擴大內需市場約兆元商機，

因此國內已有業者規劃投入國產離岸風力機開發，是建立自主設計技術能量之契機。本文所介紹之多自由度硬體在環測試平台，可提供離岸風力機的功率鏈(或機艙總成)在陸上實驗室執行完整試驗以驗證及確認風力機之可靠度與設計壽命，此作法在歐美先進風電國家中已形成主流趨勢，值得國內思考採用，期能藉此來強化國產離岸風力機之品質及競爭力。■

致謝

本文為經濟部能源局補助之千架海陸風力機設置推動及關鍵技術研發計畫(104-D0106)執行成果。感謝能源局的支援，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

參考資料

1. Martin Kühn, “Dynamics and Design Optimisation of Offshore Wind Energy Conversion Systems,” PhD Dissertation of TU Delft, p.51, 2001
2. Shuangwen (Shawn) Sheng, “Report on Wind Turbine Subsystem Reliability — A Survey of Various Databases” , NREL/PR-5000-59111, June, 2013.
3. Richard Court, Alan Waggott, “Full Scale Testing Facilities –Ensuring Reliability for Offshore Wind” , NAREC.
4. IEA Wind Task 35, “Full Size Ground Testing of Wind Turbines and their Components” , <https://www.cwd.rwth-aachen.de/iea-wind/>
5. http://www.nrel.gov/news/features/feature_detail.cfm/feature_id=1534Kari
6. http://www.vindenergi.dtu.dk/English/About/Sections/Test_measurements.aspx
7. G. Jacobs, Ralf Schelenz, “Gondeltest: Möglichkeiten & Herausforderungen” , Branchentag Windenergie 2014, RWTH Aachen.
8. D. Bosse, D. Radner, R. Schelenz, G. Jacobs, “Analysis and Application of Hardware in the Loop Wind Loads for Full Scale Nacelle Ground Testing,” DEWI MAGAZIN NO. 43, AUGUST 2013
http://www.dewi.de/dewi_res/fileadmin/pdf/publications/Magazin_43/12.pdf
9. Jui-Sheng Chou, Wan-Ting Tu, “Failure analysis and risk management of a collapsed large wind turbine tower,” pp. 295-313, Engineering Failure Analysis, Volume 18, Issue 1, January 2011
10. <http://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/1305/08/news014.html>
11. Test Stands for the Wind Power Industry, <http://www.renksystems.com/test-systems-stands-rigs-wind-power.php#prettyPhoto>

作者簡介

張永源現任職工業技術研究院資源應用技術組正工程師兼推廣經理

專長：

- 傳動系統設計與製造
- 風力發電技術推廣

桂人傑現任職工業技術研究院綠能與環境研究所

專長：

- 電機控制
- 風力機電能轉換