

風力發電技術之發展概況

林法正[¥] 鄧禮濤[§] 余孟勳[§] 林正文[§]

[¥]國立中央大學 電機工程學系

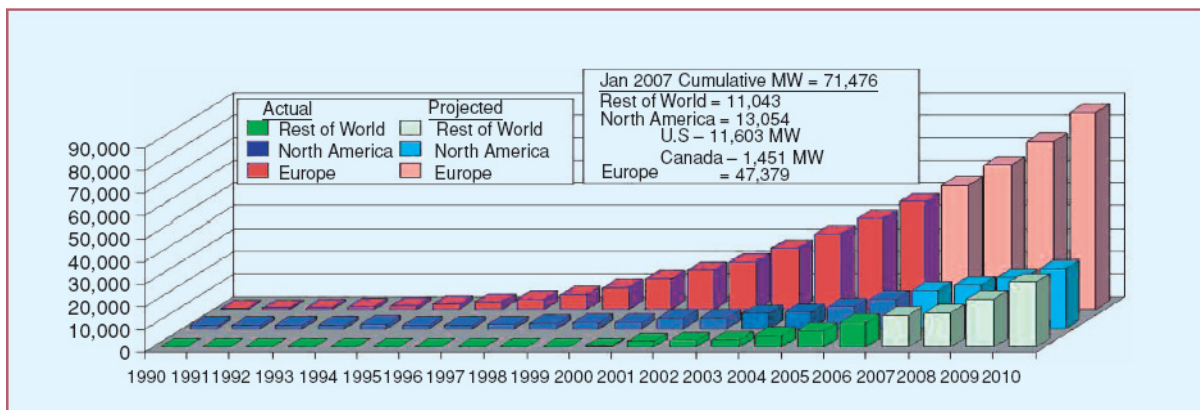
[§]國立東華大學 電機工程學系

一、前言

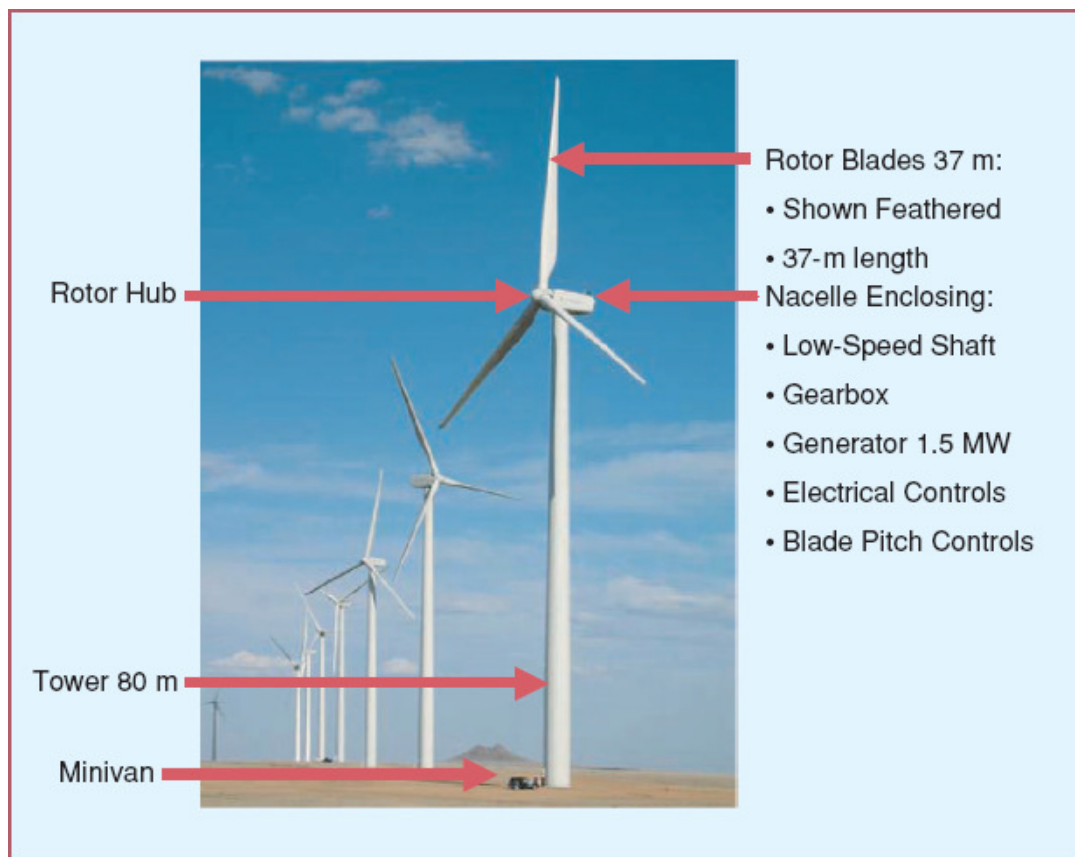
從 1970 年風機的誕生至今，風力發電的技術已有顯著的成長，其成本不斷下降、可靠度不斷提升以及效率越來越高。風機製造商不斷地在世界各地將高品質及更大容量的風力設備整合至電力網路系統。並藉由持續生產這些先進的風機設備，使風力發電的成本慢慢接近傳統化石燃料發電設備，甚至更低廉。直至 2006 年底，以美國為例，獲得之總風能已成長到 11,603MW，這容量足以提供約 2 千 9 百萬個家庭來使用。如圖一所示，美國與歐洲風力裝置容量的年成長率分別約為 20%與 30%。儘管有如此顯著的成長，但風力發電只佔了美國用電量的 1%不

到。因此，美國與歐洲的目標是在 20 年內將風力發電提升到總用電量的 20%。

現今風機分布於世界各地，最普遍的為圖二所示之 1.5MW 風機系統，由直徑為 70 米至 80 米的三個葉片架設在 60 米至 80 米的塔上所組成。以 2006 年安裝於美國的風機為例，每台風機可以擷取大約 1.5MW 的能量。其中風機所擷取的能量是由葉片與迎風面的角度來決定，換句話說，控制葉片的仰角就能控制風能的擷取。而迎風面的控制，是藉由架設於風機塔頂端之機艙上的風感測器告知控制器偏移的角度來達成。此外，利用葉片的仰角控制與轉子的轉速控制可以防止過大的風能擷取。一般而言，風速



圖一、全球風力裝置容量之成長圖 [1]



圖二、1.5MW 之風機系統 [1]

達到 12mph (mile per hour)時，風機即可產生功率，其工作的最大風速約可達 28mph 至 30mph 之間。但是當風速到達 50mph 時，會將葉片角度變成水平來停止擷取功率。

而風能的擷取與風速的三次方成正比，因此當風速增加 10%，可獲得之功率就增加了 33%。然而，因為風機有額定輸出功率，所以只能擷取到一部分的風能。此外，因為在更高的地方能擷取到更多的風能，因此風機的高度與大小不斷地增加。但是以內陸型的風機為例，其大小已達到一個極限。目前許多的風機製造商不再期待內陸型之風機的葉片直徑能大於 100 米，其相對之輸

出功率可達 3MW 至 5MW，主要原因是增加風機的大小雖是可行的，但是如何運送與架設如此龐大的風機將是一個大問題。

二、商業風機之概況

1. 性能與價格

商業風機的性能隨著時間提升，容量係數也持續的增加。而風機是在容量係數呈現成長的趨勢下才開始商業運作，並在 2004 至 2005 年達到 36%。當第一部商業風機於 1980 年開始在美國加州運作時，風力發電的成本已有顯著的下降。以 2006 年為例，風力發電設備所產生的每度(千瓦-小時)電約

在美金 3 至 6.5 分錢左右，平均約為美金 5 分錢。此價格已經包含了美國聯邦政府的抵扣稅額與販賣再生能源的稅收抵扣。因此，實際的費用每度電大約會多美金 1.9 分錢。也就是說，若無補助金，2006 年每度電所需的花費約美金 5 至 8.5 分錢。

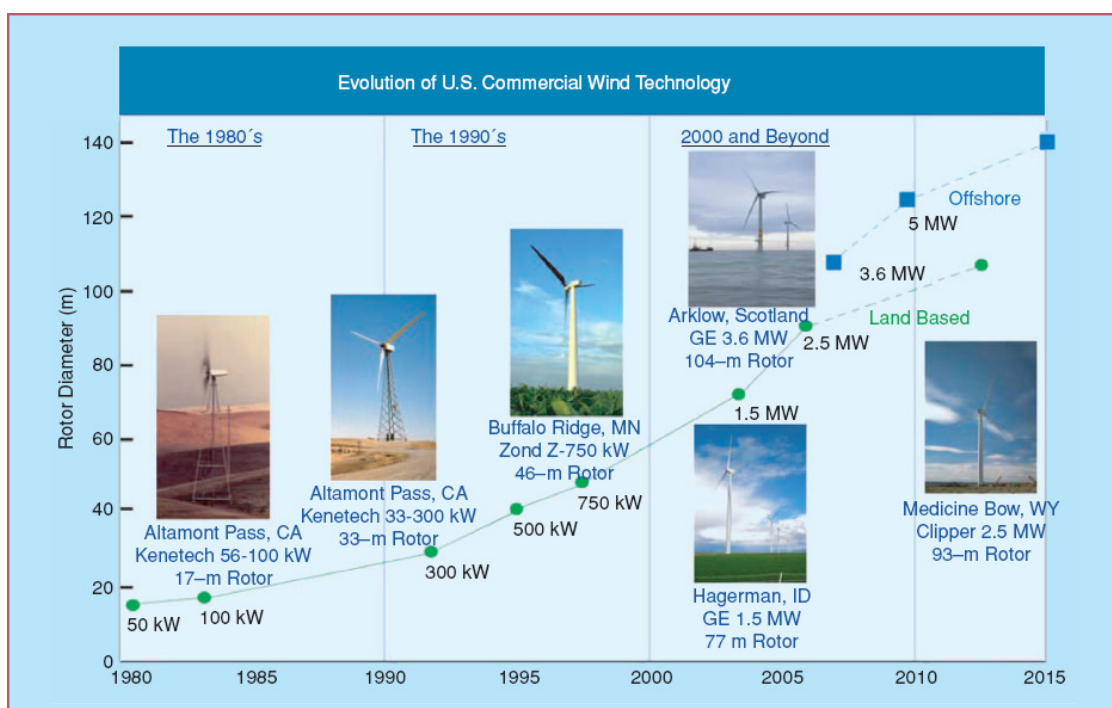
在過去 25 年間，風機的價格有向下降之趨勢，但近期風力發電價格卻增加的原因有：(1) 因美國與歐洲的風機工業急劇的成長，導致風機之元件缺乏。(2) 美元不斷貶值(因為許多風機元件都是由歐洲生產，美國所生產的元件較少)。(3) 在過去三年，鋼、銅材料的價格不斷攀升加上運輸的燃料昂貴。(4) 反反覆覆的扣稅額度。這些不確定因素阻礙了新型風機的投資，導致生產成本

與運輸價格昂貴。

2. 風機的大小

風機系統之發展趨勢圖如圖三所示。過去 20 年間，風機的大小隨著時間線性成長，目前最新型的商業風機可達 3.6MW。雖然每個製造風機的公司都預測設計的風機是越大越好，然而隨著製造、運輸與架設之經費亦隨之增加，並無法有效的降低產生每度電之成本。

長久幾來，因為風機的風切越大所獲得的能量越大的關係，所以不斷的想把風機做大，這也是容量係數不斷提升的主因。然而，風機的大小是有限制的，一般來說，風機越大成本就越高。此外，風機大小限制的爭議主要是在於「平方-立方法則」。簡單來



圖三、風機系統之發展趨勢圖 [1]

說，增加風機的大小，其擷取的能量會因葉片掃過的面積(半徑平方)增大而增加；但因為體積的增大，其設計製造的材料成本隨著三次方(立方)增加。換句話說，體積越大，其花費會比生產能源的收入來的多，不符合經濟效益。因此，許多工程師想辦法利用改變設計方式，如增加大小，但減少材料使用並減輕其重量，以降低成本，來避開這個法則。

三、風力發電技術

近年來風力發電技術利用電力電子轉換器(例如結合高等控制系統的交流/直流/交流轉換器)讓市電頻率與機械轉子頻率能夠互相解耦，使風機得以在變速狀態下運轉，因此變速風機在近幾年有著顯著的進展。下面將介紹三種常見之變速風車：

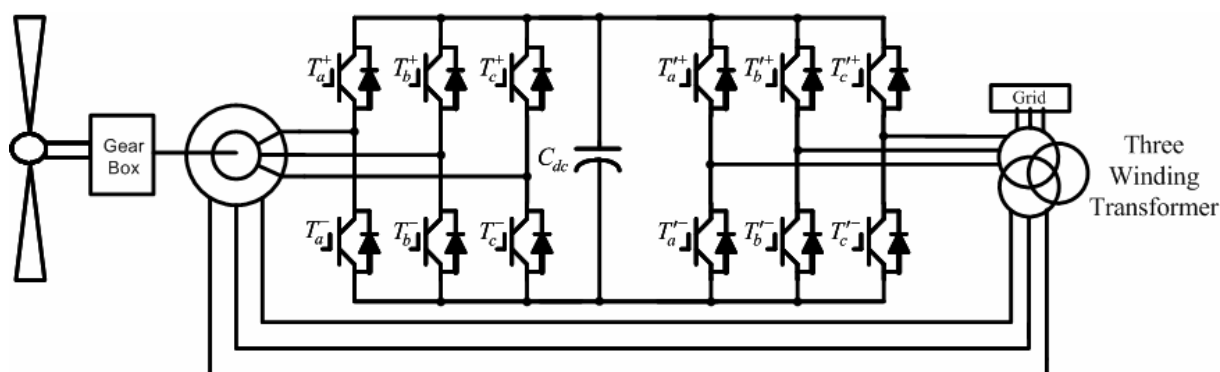
1. 雙饋式感應發電機之變速風車

在變速雙饋式風力感應發電機中，轉換器連接至轉子繞組，而定子繞組直接連接於

市電。藉由這個轉換器，可以使機械與電氣頻率解耦，利用改變發電機之電氣頻率下風機可操作於變速。但由於一般轉換器之功率比起機械額定功率小，導致轉速範圍受到限制。雖然此轉換器不能在從零到額定轉速之間全部的範圍下工作，但是已具有足夠之工作範圍。另一方面，由於轉換器功率較小，因此損失也相對較小。西班牙 Gamesa 公司即專門生產這種變速風力發電機，其功率轉換器如圖四所示，此轉換器包含了兩組三相交流對直流轉換器，並經由一個電容連接在一起，這種架構一方面可以利用向量控制來控制實功率及虛功率，另一方面則可以減少諧波經由轉換器進入市電。

2. 利用全功率轉換器的變速風車

利用此方法，發電機可以完全的與市電端解耦。從發電機所產生的交流電可以先被整流成直流電，再經由功率轉換器將直流電成轉成適當的交流電給市電。圖五為應用功率轉換器之鼠籠式感應發電機系統，靠近風



圖四、應用功率轉換器之雙饋式感應發電機

機端的三相轉換器利用向量控制來控制發電機轉矩，並將風能轉為電能，而靠近市電端的三相轉換器可以將電能傳送至市電，並且控制給市電實功率及虛功率的大小。同時也可以保持總諧波失真在一定的數值，改善傳送給市電時所造的能量損耗並提升供電品質。其中直流鏈是扮演著能量儲存的角色，從風獲取的能量經由電容充電來儲存，並控制直流鏈上的電壓為一固定值。

3. 應用整流子與功率轉換器的變速風車

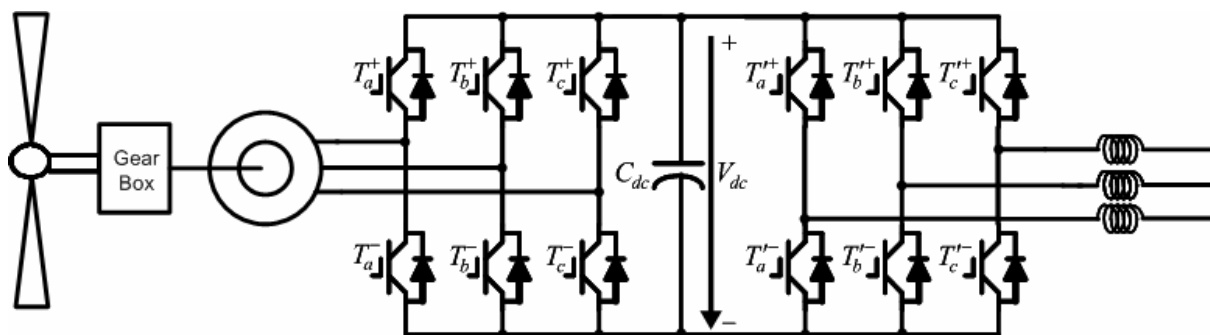
另一個方法是利用同步發電機來取代感應發電機，並且由三相二極體整流器和截波器來取代圖五中靠近發電機端的功率轉換器進行功率調節，如圖六所示。與感應發

電機連至功率轉換器相比，圖六中之直接整流成本會較低。當風速改變時，經由二極體整流所產生的直流鏈電壓也會隨之改變，並利用截波器來調整直流鏈電壓。

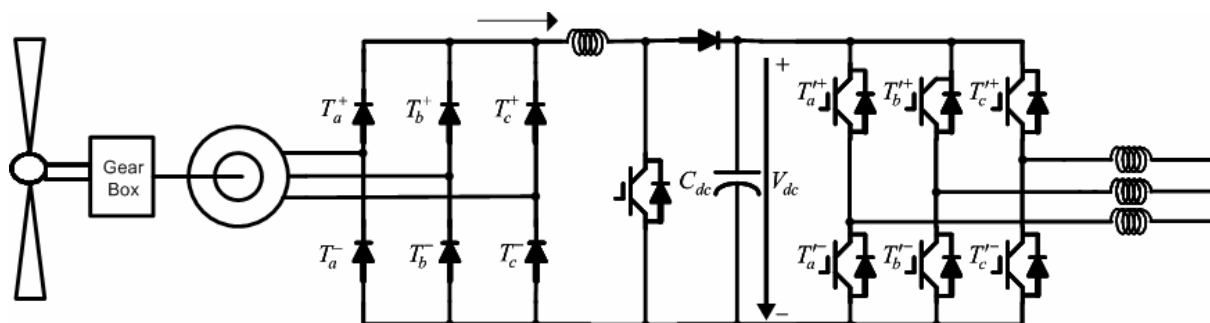
四、風力發電系統連接至市電之標準規範

1. 風力發電機故障應變能力

當風力發電機組併聯市電的容量增加後，系統運作必需保證電力品質不受到影響，尤其是大型風場受到干擾的時候(例如電壓突降)，仍然可以繼續供電給市電，且電力系統穩定性仍然不受到影響。風力發電系統必須具有與傳統的電力系統相同之功能，即在故障發生後風場能立即產生實功率與虛



圖五、應用功率轉換器之鼠籠式感應發電機系統



圖六、應用整流子與功率轉換器之同步發電機系統

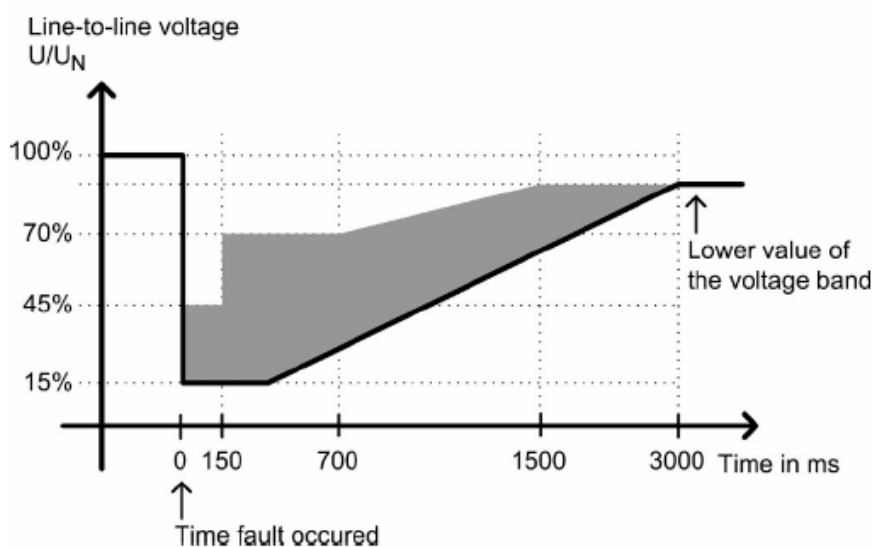
功率，使電壓及頻率回復。因此，包含虛功率控制、頻率響應及故障發生時的應變能力等技術均應用在風力發電機組與市電併聯上。尤其是在風力發電佔了大部分發電量的國家，如西班牙、丹麥及德國，特別重視這些問題。

這些規範對於風力發電系統發展、建造及電力系統運作的關鍵技術是很重要的。風力發電在併聯市電上的操作規範包括頻率範圍、電壓容忍度、功率因數及故障應變能力。在這些規範中，故障應變能力被視為是風力發電系統中最主要的一個。如圖七為德國公用輸配電之標準，這套標準規定當市電電壓下降至正常值的 15% 時，風力發電機組必須仍保持穩定且依然與市電網路連接至少 150ms。只有當市電低於這條曲線，風力發電機組才允許從市電解耦。當電壓在陰影

區時，發電機應該產生虛功給市電來支持市電恢復。

2. 連接至市電的電力品質需求

過去這幾年來，主要的焦點是在風力發電與市電間的交互作用與對市電的衝擊。在對風力發電系統有興趣的背後，必須考慮到風力發電機會對電力品質產生潛在的不良影響。根據一些量測結果顯示，風力發電機組對電力品質的衝擊在近幾年有大幅的改善，特別是變速風力發電機的電壓閃爍。不過變速風力發電機上仍有些問題存在：現代的變速風力發電機所使用的變頻器不但會產生諧波，也會產生間級諧波 (Interharmonics)。1998 年時，國際電子技術委員會 (International Electrotechnical Commission, IEC) 在風力發電機連接至市電的電力品質要求上頒布了 IEC-61400-12



圖七、德國公用輸配電之標準 [2]

之標準。這套由 IEC 所頒布的標準主要有三種分析方法：第一種是電壓閃爍分析，除風力發電機之切換狀態外，並虛擬電力系統沒有電壓源的波動的情況，利用電壓與電流在連續時間內之量測，來模擬的市電電壓波動。第二種方法主要關注於風力發電機在切換狀態下(在切入風速下起動及額定風速下起動)，量測電壓與電流的暫態響應。最後一個是利用快速傅立葉分析來對諧波進行分析。另外，IEC 針對高頻諧波和間級諧波制定了 IEC 61000-4-7 和 IEC 61000-3-6 這兩套規範，其中 IEC 61000-3-6 標準結合了諧波及間級諧波之規範，適用於風力發電機。

五、風力發電技術之改良與未來展望

1. 技術之改良

雖然在風能技術上已經沒有什麼重大突破了。但是目前仍有許多研究持續在進行，預計這些研究能在 10 年內降低風力發電成本 30%到 40%，其中以美國 WindPACT (Wind Partnerships for Advanced Component Technology)最具成效。

(1) 改良型的轉子

當風機的大小不斷的提升，轉子必須增加其性能以承受更大動態負載，且不隨體積變大而花費有三次方的成長。因此，研發出許多方法來減緩負載的影響。高強度-質量比

的碳纖維為一種被開發並結合利用的材料。它能提供葉片高強度並減輕整個葉片的質量。其中一種研究開發中的新型螺旋槳型葉片，利用增加葉片厚度使其結構有更好的強度。一般而言，薄而平的葉片對於負載的效率並不高，而較厚的葉片在空氣動力學中能更有效的應用。

另一個研究則是在不增加質量情況下增加葉片的長度，此研究有很大的效益，因為根據應用在玻璃纖維上的經驗法則，減少 10%的週期性壓力，可增加葉片一倍的使用年限。另一方面，利用空氣動力學控制葉片，即利用仰角控制系統，使其在混亂的風下亦能減少葉片的負載，以降低材料疲勞。

另一種新的想法是直接利用葉片的設計來被動的降低負載，利用特殊的合金來使葉片彎曲變形。這個設計來自於鳥類的拍打翅膀(改變仰角和翅膀的彎曲)，能使外側一部分的葉片彎曲。此方法已利用設計葉片內部架構或是應用玻璃纖維和碳纖維來實現。這種彎曲能改變風接觸到葉片角度，如果設計得當可以被動的降低狂風時所造成葉片的負載以降低其疲勞。另一種方法是直接將葉片設計成符合空氣動力學的彎曲形狀，但是此種新型的葉片設計方法較為複雜且必須經過不斷的測試來達到最佳的形狀設計為其缺點。其他還有許多方法，例如適

合的設計方法及葉片的裁切方式亦被不斷的研究來降低成本。

(2) 新型的驅動方式

WindPACT 的研究計畫中亦包含新型驅動方式的研究，許多獨特的設計不斷的被提出來，以降低驅動器的重量與成本，並提高可靠度。其中一種方法是利用直接驅動發電機來省去設計複雜的齒輪箱以提升可靠度，但付出的代價是低轉速的發電機必須有很多的極數且直徑非常的大。依據這種設計方法，發電機的直徑約 4 米至 10 米左右，相對的體積大且非常的重。

利用稀土族永磁來設計永磁同步發電機以降低成本並提高可利用性是被期待的，永磁同步發電機的設計可因此大幅的縮小其體積並降低繞線的損失。1.5MW 直接驅動的永磁發電機的原型已被設計出來，有 56 個極點而直徑卻只有 4 米相對於繞線式的 10 米。此原型正在國家再生能源實驗室 (National Renewable Energy Laboratory, NREL) 的風力技術中心測試中。

另一種混合型直接驅動方法是利用單級行星齒輪驅動低轉速發電機以提供未來大型機組的設計願景。此方法結合低轉速發電機，其體積比直接驅動發電機更小。WindPACT 計畫已設計出此種原型機，此設計利用 9.16:1 單級的行星驅動齒輪箱來驅動

一台 190rpm、72 極的永磁同步發電機。此方法能將 1.5MW 級發電機的直徑降低到 2 米，目前並在 NREL 的風力技術中心製造及測試中。

另一種降低大小、重量及成本的方法是利用分散式的驅動。此方法是利用多組齒輪，使風機同時驅動多台並接之發電機，一些研究顯示利用許多小齒輪將風機轉子的轉矩分散，能有效的降低其發電機之體積及重量。在 2006 年，Clipper Windpower 公司已研製出了一台 2.5MW 的原型機。

(3) 新型的風機塔

因為大型吊車的需求與風機塔及大型葉片對運輸上之需求，對於風力發電之成本影響很大，驅使了新型風機塔的研發。許多方法研究提出不需要吊車即可吊起重物到高處，例如自立式風機塔。自立式風機塔利用了推車和架設好的軌道與爬行式吊車將風機艙及轉子運送到風機塔的頂端。

另一方面，目前美國能源部門的 WindPACT 計畫之研究領域包含：降低風機的成本、增加能源的產量、提高可靠度、保養與維修及風場的平衡等，對於能源的產量及成本有很大的影響，其研究成果如表一所示。

2. 未來展望 (離岸的風能)

由於離岸風能資源是非常豐富且廣泛

的分佈的，因此美國與歐盟競相投入研究。歐盟目前有 19 個離岸的風能計畫正在進行，其容量約為 900MW，架設地點約在海面下 22 米處。雖然許多計畫受限於高額的建造與維修費用，但其在歐盟市場上的成長仍是可觀的。而美國目前約有 10 個離岸的風能計畫在執行，其總容量約 2,400MW。

淺水式的風機是由陸上型風機依據海洋資訊做些小幅度的改良，修正的部分包括：(1)對於海浪的衝擊而在結構上的改良，(2)加壓的機艙，(3)環境的控制來預防海上空氣對風機造成的侵蝕與元件的毀損，(4)方便人員維修保養及發生緊急情況的操作平台

與避難場所，(5)為了縮減維修花費，離岸的風機必須裝配有自動監控系統、自動軸承加油系統、在船舶上的吊車裝置和油料溫度調節系統，因此裝備上之需求要比陸上型風機來的多。

現今的離岸型風機，其容量從 2 至 5MW，葉片為三葉型，水平式軸承風機，葉片直徑約 80 米至 126 米左右。因為風切數據比較緩和的關係，風機塔的高度比陸上型的低。離岸型的風機本質上與陸上型的有所不同，離岸型技術利用陣列式單樁在海面下大約 20 米處架設。單樁是一種厚度為 6 公分直徑為 6 米的鋼管，埋入土裡的深度根據

表一、風機系統各方向之研究成果 [1]

Technical Area	Potential Advances	Cost Increments (Best/Expected/Least, Percent)	
		Annual Energy Production	Turbine Capital Cost
Advanced Tower Concepts	<ul style="list-style-type: none"> • Taller towers in difficult locations • New materials and/or processes • Advanced structures/foundations • Self-erecting, initial or for service 	+11/+11/+11	+8/+12/+20
Advanced (Enlarged) Rotors	<ul style="list-style-type: none"> • Advanced materials • Improved structural-aero design • Active controls • Passive controls • Higher tip speed/lower acoustics 	+35/+25/+10	-6/-3/+3
Reduced Energy Losses and Improved Availability	<ul style="list-style-type: none"> • Reduced blade soiling losses • Damage tolerant sensors • Robust control systems • Prognostic maintenance 	+7/+5/0	0/0/0
Drivetrain (Gearboxes and Generators and Power Electronics)	<ul style="list-style-type: none"> • Fewer gear stages or direct drive • Medium/low speed generators • Distributed gearbox topologies • Permanent-magnet generators • Medium voltage equipment • Advanced gear tooth profiles • New circuit topologies • New semiconductor devices • New materials (GaAs, SiC) 	+8/+4/0	-11/-6/+1
Manufacturing and Learning Curve	<ul style="list-style-type: none"> • Sustained, incremental design and process improvements • Large-scale manufacturing • Reduced design loads 	0/0/0	-27/-13/-3
Totals		+61/+45/+21	-36/-10/+21

土壤成分不同而不同，一般而言約在架設 25 米至 30 米深，並在表面灌水泥將其栓緊。此外後勤支援與基礎的架設佔離岸式風機的花費一大部分。根據目前的預測，離岸型的風機發電成本每度會高於美金 10 分錢。

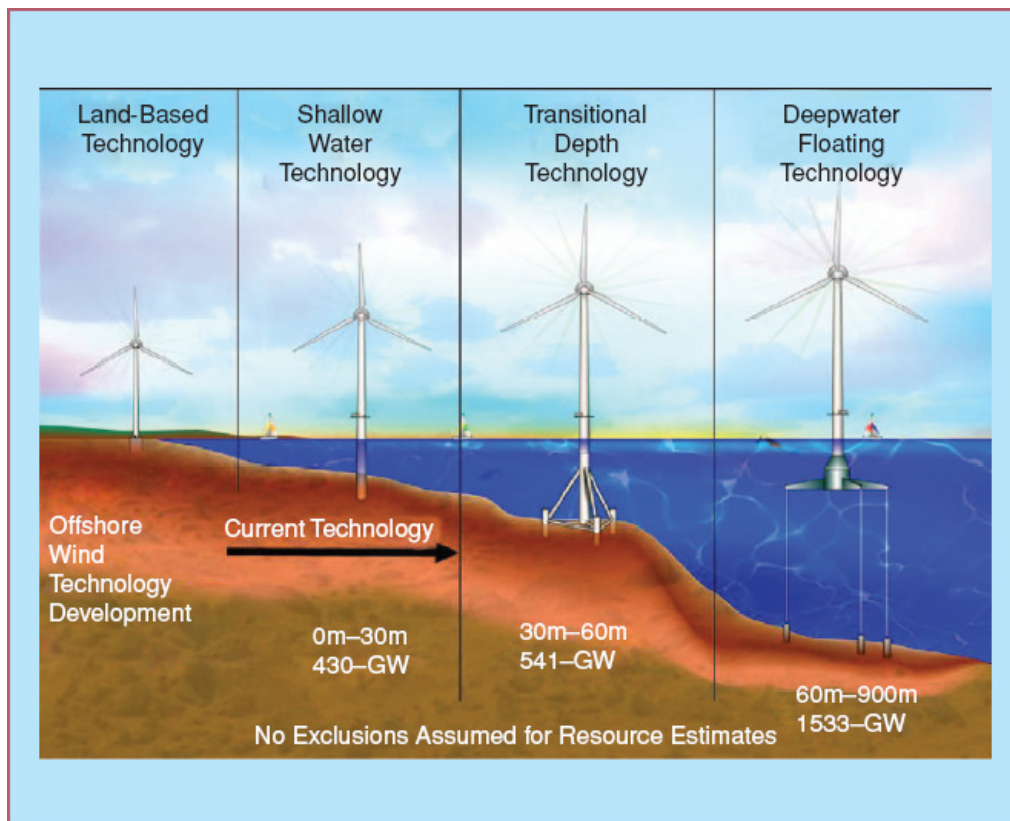
如圖八所示，離岸式的風機之裝設有三種漸進之方式。第一種方式成本較低，深度約 0 米至 30 米的淺水處，不需要部署電池。第二種方式為一般架設的深度，此技術與一般離岸式探勘石油天然氣的深度相同，其深度約在 30 米至 60 米左右。第三種方式是在深海處，深度約在 60 米至 900 米，可能需用到漂浮系統，這需要更多的研究與開發，

讓風機的重量更輕以架設在浮動的平台。

新型的離岸型風機技術將會被用來製造 5MW 至 10MW 左右或更大之風機，這些技術包含開發輕型的複合材料與合成製造技術、輕型之驅動鏈、直接驅動發電機、混合型風機塔、大型的齒輪箱與軸承設計以承受低轉速。安裝在風機上的控制系統與偵測系統的價格不會因風機體積的大小增加而成長，反而在暴風侵襲下之可靠度必須要提升，以延長風機的壽命。

六、結論

在過去 10 年，風力發電已發展的非常



圖八、離岸式風機發展圖 [1]

快速，發電成本已有效地被降低，可靠度與效率也被大幅的提升，使風力發電在市場上更具競爭力。研發之投入與嚴格設計標準的建立，緩和了技術上的風險，使得投資者有願意發展更大型的商業風機。可預期的是隨著未來石化燃料的價格逐漸攀升，可提供可靠電力來源的高品質風力發電機設備會愈

來愈具有競爭力。雖然陸上型風機除了風場的探勘及發展分散式電源技術使風機能很容易的與電力系統併聯外，已經很難有什麼重大的技術突破，但新一代的風機結合了新型的整合技術與更好的工程技術。此外，隨著技術之持續進步，離岸式風力發電在世界電力的發展上將逐漸佔有一席之地。

參考資料

- [1] R. Thresher, M. Robinson, and P. Veers, "To capture the wind," *IEEE Power and Energy Magazine*, Vol. 5, No. 6, pp. 34-46, 2007.
- [2] J. M. Carrasco, L. G. Franquelo, J. T. Bialasiewicz, E. Galvan, R. C. Portillo Guisado, M. A. M. Prats, J. I. Leon, and N. M. Alfonso, "Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: a survey," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 53, No. 4, pp. 1002-1016, 2006.
- [3] F. Blaabjerg, Z. Chen, and S. B. Kjaer, "Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems," *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 19, No. 5, pp. 1184-1194, 2004.
- [4] F. J. Lin, L. T. Teng, P. H. Shieh, and Y. F. Li, "Intelligent controlled-wind-turbine emulator and induction-generator system using RBFN," *IET Electric Power Applications*, Vol. 153, No. 4, pp. 608-618, 2006.
- [5] F. J. Lin, P. K. Huang, C. C. Wang, and L. T. Teng, "An induction generator system using fuzzy modeling and recurrent fuzzy neural network," *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 22, No. 1, pp. 260-270, 2007.