



全球風力發電技術研發趨勢

摘要

風力發電技術已發展超過百年，1980 年以後風力發電相關產品技術快速發展，在 2005 年以前以陸域風電為主，近幾年因離岸風電應用興起，帶動另一波產品技術之發展。

2011 年以後全球陸域風電市場成長速度減緩，各界期望離岸風電成為下一波風電市場成長動力。目前全球陸域風電主流為 2~3.5MW，離岸風電主流為 4~8MW。已開發完成、單機容量最大之機組為丹麥 MHI Vestas 8MW 風力機，此機組已於 2017 年進入商轉階段。

1. 前言

全球第一部風力發電機由丹麥科學家 Poul La Cour 於 1890 年代所開發，之後到 1980 年以前，因相關配套技術與整體環境未到位，風力發電機產品經濟效益不高，風力發電技術並未獲得進一步發展。在 1980 年以後，因化石能源日益稀少、環保意識逐漸抬頭，帶動風力發電技術發展，在 1985 年首度開發出功率超過 100kW 之風力機，1990 年代產品功率突破 500kW，2000 年以後則有 MW 等級風力發電機。2005~2010 年風力發電躍升主流能源技術，在中國、美國、印度等市場陸域風力機裝置數量快速成長下，風力發電占全球電力供應在 2007 年突破 1%，2011 年超越 2%。2011 年以後全球陸域風電市場成長速度減緩，各界期望離岸風電成為下一波風電市場成長動力。

風力發電產品技術可分為三個部分：1. 風力機系統；2. 風力機重要零組件如葉片、傳動系統、發電機等； 3. 其他重要配件如離岸風電之水下基礎。各種產品技術彙整之技術藍圖於表 1，詳細內容於之後分別說明。

表 1 風力發電技術指標未來達成狀況

	2016	2021(f)
系統	● 陸域風力機系統主流為 2~3.5MW，離岸風力機主	● 陸域風力機主流持續為 2~3.5MW，離岸風力機主



	<p>流為 4~8MW。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 風力機能源轉換效率已趨於穩定，一般大型風力發電機最高轉換效率(peak efficiency)可超過 40%，歐美學術與研究機構持續進行提升效率之研究。 ● 降低成本為風電產業發展主要課題之一。 	<p>流提升為 8MW 以上。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 降低成本為風電產業發展重要課題。降低成本最重要方式為使用大容量風力機，以及擴大風場規模，其他降低成本的方式包括興建流程標準化、降低風力機與相關配件採購成本、尋求利率較低的資金來源等。
重要零組件	<ul style="list-style-type: none"> ● 葉片：45~60 公尺為主。 ● 傳動系統：行星式齒輪為主。 ● 發電機：雙饋感應式發電機(DFIG)為主流。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 葉片：50~60 公尺為主，60 公尺以上比例提升。 ● 傳動系統：仍以行星式齒輪為主，直驅式次之。 ● 發電機：雙饋感應式發電機(DFIG)占比仍最多，永磁同步發電機(Sync PMG)比例增加。
其他配件	<p>離岸風電水下基礎以單樁式居多。</p>	<p>離岸風電套管式/三腳架/三樁式形式比例增加，單樁式比例逐漸減少。浮體式水下基礎開始有商轉實例。</p>

資料來源：工研院整理(2017/09)

2. 風力機系統

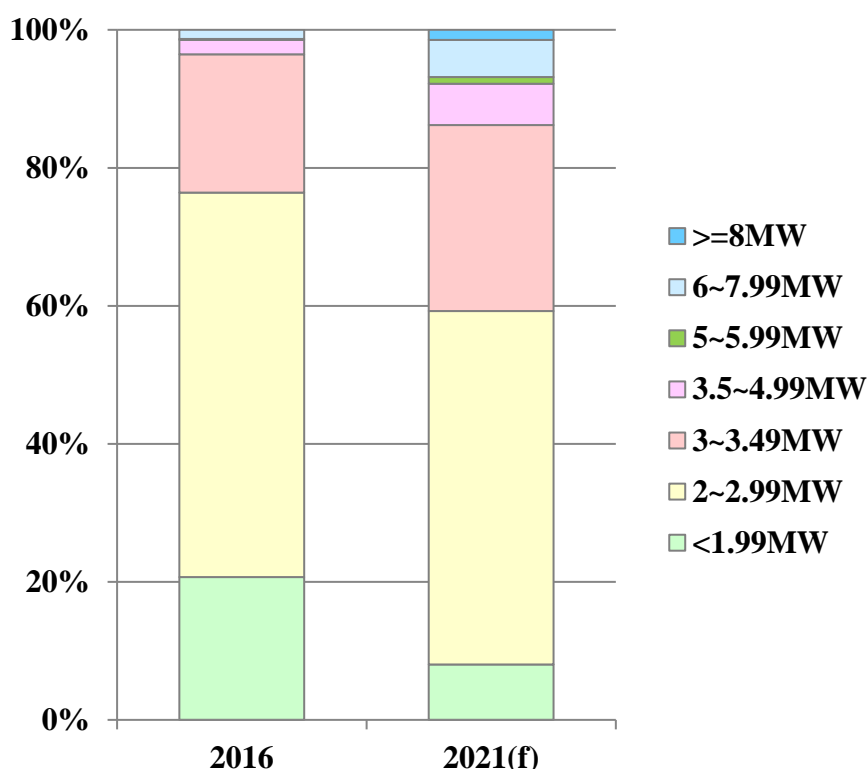
風力機系統為風力發電產業之核心，主要技術趨勢包括提高風力機容量、增加能源轉換效率，以及降低成本，以下依序敘述此三項趨勢：

2.1. 風力機系統容量

為了降低發電成本與有效利用風場之風力資源，風力機持續往大型化發展。陸域型風力機受限於運輸條件、居民生活影響等因素，一般陸域風場較少使用超過 3MW 機組，容量大於 3MW 以上之機組大部分上應用於離

岸風場。

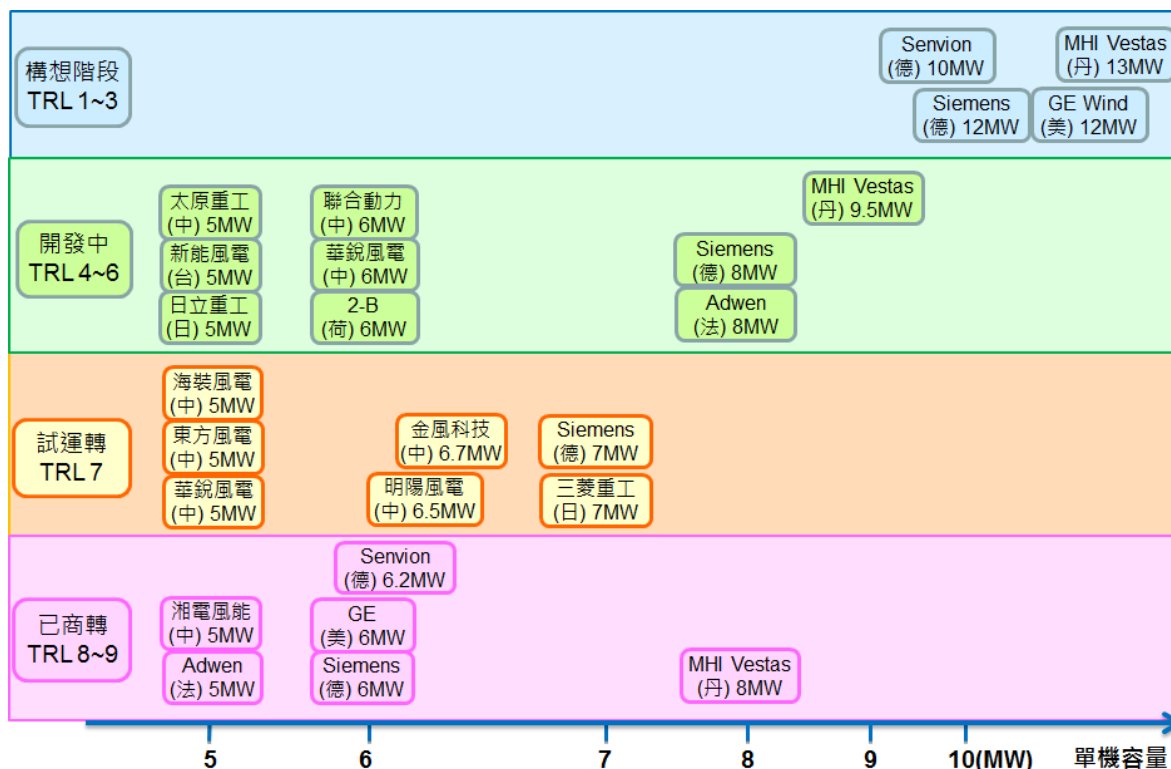
全球風力機產品規格分布如圖 1 所示，2016 年比例最高為 2~2.99MW 風力機，3~3.49MW、以及 1.99MW 以下次之。預計 2021 年 3~3.49MW 比例增加，2.99MW 以下比例減少，容量往較大容量機種發展。值得注意的為 6MW 以上比例由顯著成長，由 2016 年 1% 提升至 2021 年 6%，主要用於離岸風電市場。



資料來源：MAKE Consulting；工研院整理(2017/09)

圖 1 全球風力機規格發展趨勢

5MW 以上風力機為各廠廠商投入研發之重點，現階段德國 Siemens、MHI Vestas、法國 Adwen、德國 Senvion、美國 GE、中國大陸湘電風能等廠商之產品已進入商轉階段，其他多家廠商包括日本三菱重工、中國大陸金風科技、明陽風電、華銳風電、東方風電、海裝風電等風力機組已進入試運轉階段，多家廠商持續投入 5MW 以上風力機之開發，全球已有 15 家以上廠商投入 5MW 以上之離岸風力機，將於未來三年陸續推出產品。



資料來源：工研院整理 (2017/09)

圖 2 全球主要廠商 5MW 以上風力機開發進度

2.2.增加風力機能源轉換效率

風能轉換成電能轉換效率理論值上限約 59%，實際上大多數葉片轉換風能效率約 30~50%，經過機電設備轉換成電力後，總輸出效率約 20~45%。風力發電機之能源轉換效率隨著風速大小而改變，不同廠牌風力發電機轉換效率對應風速之曲線均不同，最大影響因素為葉片之設計，其他包括傳動軸、發電機與電力轉換系統之設計方式也會有影響。

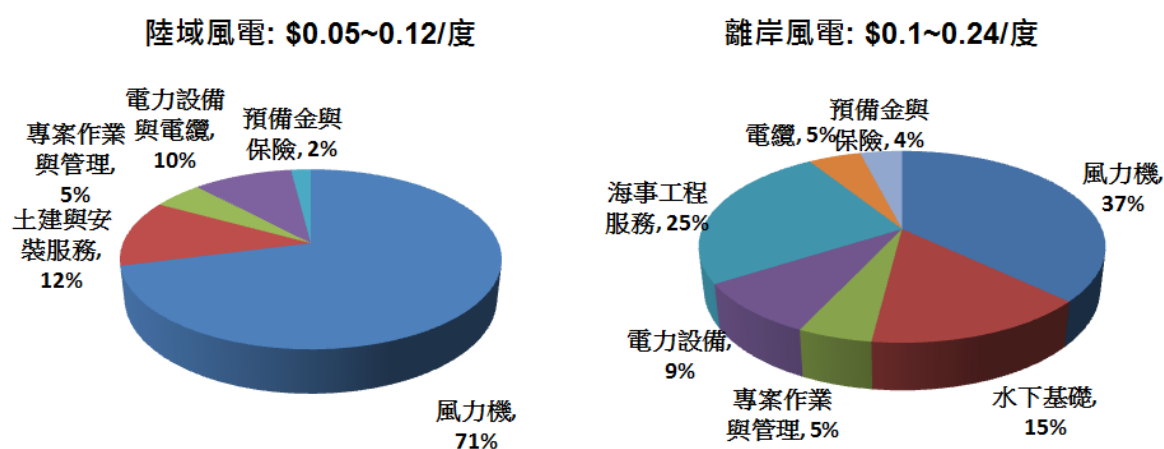
風力發電機經過多年發展，能源轉換效率已趨於穩定，一般大型風力發電機最高轉換效率(peak efficiency)可超過 40%，目前歐美各國學術與研究機構仍持續進行提高轉換效率之研究，例如從改變風力機葉片造形、提高發電機效率、提高電力轉換器效率著手。

2.3.降低風力機系統成本

電力行業一般使用 LCOE(Levelized Cost of Energy；均化能源成本)衡量成本，其將整體生命週期中所有成本，包括規劃、建置、營運與維護，

對應整體生命週期可以產生之產出，並折算成現值，以評估單位產出所需要之成本，如\$/kWh(每度電之成本)，做為不同來源能源之間成本比較之依據。

風力發電在應用上可分為陸域風電與離岸風電，兩者成本結構有很大差異，如圖 4 所示，陸域風場風力機成本約占七成，離岸風場僅約占三分之一強；離岸風場風力機安裝與水下基礎合計占 40%，對應陸域風場土建與安裝成本僅占 12%。



資料來源：工研院整理 (2017/09)

圖 3 典型陸域風場與離岸風場之成本結構比較

高成本使得離岸風電應用受到限制，現階段離岸風電主要應用於歐洲電價較高之國家如英國、丹麥、德國等；亞洲地區包括中國大陸、日本、南韓、台灣等由政府主導策略性投入離岸風電發展。未來離岸風電若要大規模普及，最重要之因素為降低成本，此為各廠商未來發展首要工作。降低成本最重要方式為使用大容量風力機，以及擴大風場規模。大容量風力機可更有效利用風場土地資源，擴大風場規模可攤平前期投入之規劃、探勘、設計成本，有效降低單位成本。其他降低成本的方式包括興建流程標準化、降低風力機與相關配件採購成本、尋求利率較低的資金來源等。

3. 風力機零組件

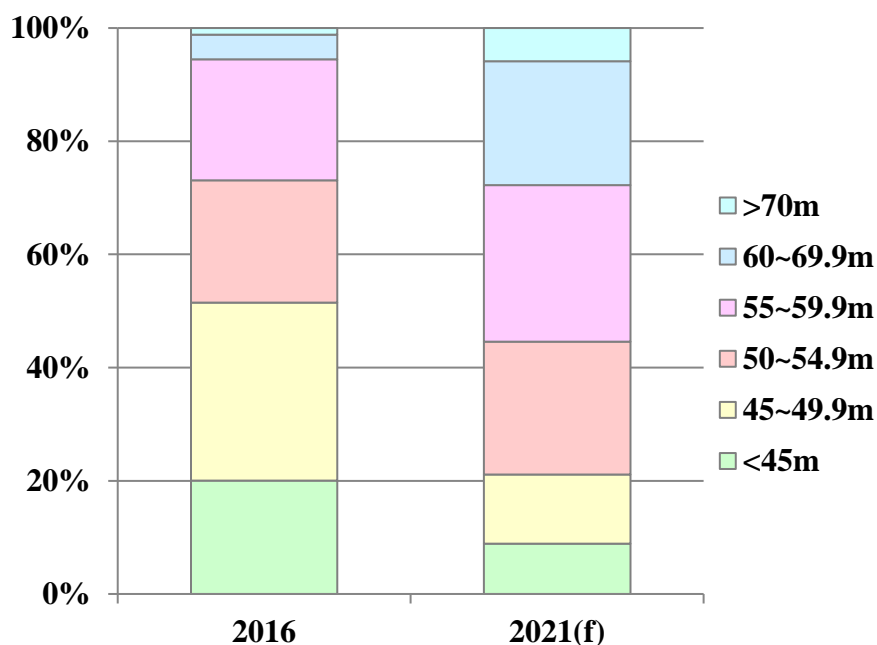
一台大型風力機由數千個零件組成，較重要的零組件包括葉片、傳動系統(齒輪箱)、發電機、塔架、控制系統、電力系統等，以下介紹關鍵零組

件包括葉片、傳動系統、發電機之技術趨勢。

3.1.風力機葉片

風力機葉片為決定風力機發電效率之重要因素，風力機葉片發展趨勢為葉片長度日益增加，主要驅動力來自於兩方面：一、為風力機朝大功率機組發展，因此需要搭配更長之葉片；二、陸域優良風場逐漸稀少，開發次級風場需要使用更長的葉片，才能和優良風場在同功率機型獲得同樣電力。例如，優良風場裝設 2MW 風力機，可採用 40 公尺葉片；若風能條件較差，同樣是 2MW 風力機需換成 45 公尺葉片，若風能條件更差，可換成 50 公尺葉片。

長度小於 45 公尺之葉片，在 2016 年比例為 20%，預估至 2021 年將下降至 8%；超過 50 公尺之葉片未來比例將逐漸增加，50~54.9 公尺葉片 2016 年比例為 21%，預估 2021 年將達到 22%；55~59.9 公尺葉片 2016 年比例為 21%，預估 2021 年將達到 26%；長度超過 60 公尺葉片預估在 2021 年比例達 27%。

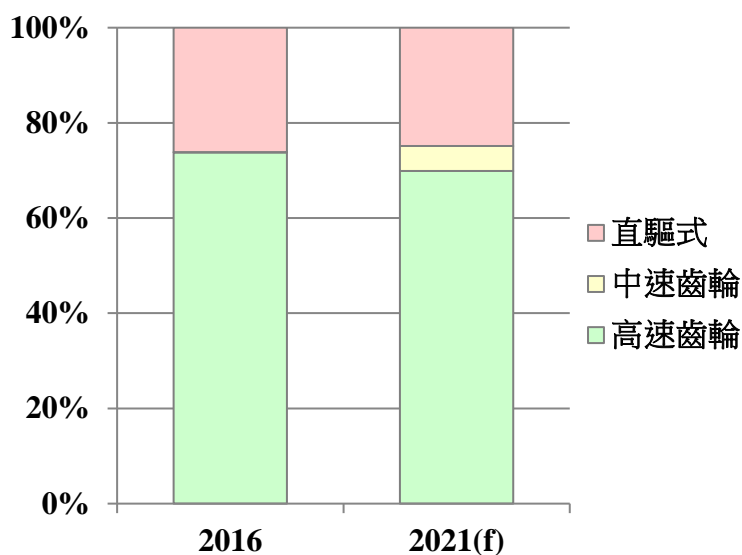


資料來源：MAKE Consulting；工研院整理(2017/09)

圖 1 全球風力機葉片規格發展趨勢

3.2. 傳動系統

在傳動系統方面，高速齒輪(三、四階行星式齒輪箱)為目前全球發展主流，中速齒輪(一、二階行星式齒輪箱)比例較少，而無齒輪箱之直驅式系統與傳統齒輪式傳動方式何者較優尚未有定論。預估 2021 年高速齒輪比例降低至 66%、中速齒輪上升至 5%，直驅式傳動系統比例略微下降至 23%。

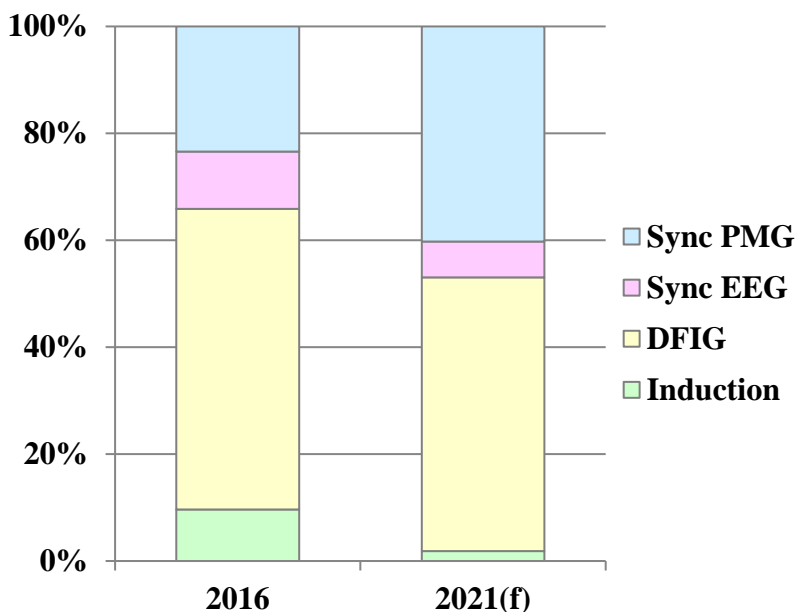


資料來源：MAKE Consulting；工研院整理(2017/09)

圖 2 全球風力機傳動系統規格發展趨勢

3.3. 發電機

在發電機方面，現階段以雙饋感應式發電機(DFIG；Doubly-Fed Induction Generator)比例最高，估計至 2021 年比例將下滑，但仍占市場約一半左右，比例提升較多為永磁同步發電機(Sync PMG or PMSG；Synchronous Permanent Magnet Generator)。自從 2012 年永磁稀土材料價格到歷史高點後，價格已逐步下滑，促使永磁同步發電機應用比例增加，預計至 2021 年 Sync PMG 比例可提高至 40%。而其他兩種發電機：感應式(Induction)與電激式同步發電機(Sync EEG；Synchronous Electrically Excited Generator)比例則下降。



資料來源：MAKE Consulting；工研院整理(2017/09)

圖 3 全球風力機發電機規格發展趨勢

4. 離岸風力機水下基礎

風力機本體以外的其他配件，以離岸風電水下基礎(或稱支撐結構、塔下基礎等)最重要，由於離岸風電屬於新興產業，哪種水下基礎成本效益最佳、最穩固尚無一定標準，且配合各風場場址之海床條件與水深深度，需發展出不同的水下基礎設計。

目前擁有專案實績的水下基礎主要為單樁式(Monopile)、套管式(Jacket)、三腳架式(Tripod)、三樁式(Tripile)、重力基礎式(Gravity Foundation)、桶狀基礎式(Bucket Foundation)。

表 1 固定式離岸風電主要水下基礎類型

技術形式	重量(公噸)	適用水深 (公尺)	運輸成本	建造成本	應用地區
重力基礎式 (Gravity Based)	2,000~3,000	<40	普通	普通	歐洲
套管式(Jackets)	<1,000	>25	較高	較高	歐洲、亞洲
群樁式 (Multipiles)	1,000~3,000	<10	較高	較高	亞洲
單樁式	600~800	<40	普通	普通	歐洲、亞洲



(Monopiles)					
三樁式 (Tripiles)	800~1,200	30~60	較高	較高	亞洲
三角架式 (Tripods)	800~1,000	30~60	較高	較高	亞洲

資料來源：工研院整理(2017/09)

現階段運行中離岸風場多採用於 3~6MW 風力機、水深至多 40 公尺，因此水下基礎以安裝便利之單樁式為主，約占市場三分之二，其次是應用於淺水海域且安裝更簡便之重力基礎式。

歐洲風能協會(European Wind Energy Association；EWEA)預期短期內離岸風電水下基礎技術發展並不容易有重大突破，不過從中長期來看，風場將逐漸往更深海域處發展，各種不同型態技術機會逐漸浮現，例如適用於水深 30~60 公尺之三腳架式或三樁式，未來將會更為普及。

除了上述固定於海床之固定式水下基礎，為求開發離岸風場不受地理條件限制，並可擷取水深更深處之風能資源，已有廠商展開浮體式(Floating)水下基礎之開發，未來水下基礎不再需要固定於海床上。目前浮體式水下基礎發展較快的技術形式包括 Statoil 之 Hywind、Principle Power 之 Winfloat、Fukushima FORWARD 之 V-Shape Semi-sub 等。預計 2018 年 Statoil (Hywind) 在蘇格蘭之風場將開始商業運轉，為全球第一座商轉風場採用浮體式基礎，但在浮體式基礎估計要到 2025 年以後才會大規模商用化，未來幾年商用化離岸風電均仍以固定式水下基礎占絕大部分。

風力發電機自 1980 年代起快速發展，至今陸域風電技術已趨於成熟，近年技術發展主要驅動力，在於離岸風電應用之快速發展，促使大型化風力機、以及離岸水下基礎技術之發展，而在其他能源技術快速發展下，降低成本(LCOE)為未來風電產業發展最重要課題。

綜合前文所述，全球風力發電技術發展趨勢可彙整成下列幾點：

- (1)風力機系統為風力發電產業之核心，主要技術趨勢包括提高風力機容量、增加能源轉換效率，以及降低成本。
- (2)風力機朝大型化發展，目前陸域風力機系統主流為 2~3.5MW，離岸風力



機主流為 4~6MW，5MW 以上風力機為各廠商開發重點；另外陸域優良風場日益稀少，次級風場使用同容量機種須將葉片加長。

- (3) 風力機零組件配合系統發展趨勢，風力機葉片長度持續增加，傳動系統變化不大，發電機部分永磁同步發電機比例增加。
- (4). 離岸風電水下基礎現階段以單樁式為主，未來套管式/三腳架/三樁式形式比例增加，單樁式比例逐漸減少。

5. 結語

全球風力發電技術研發主要趨勢包括風力機容量往大型化、全球大廠投入離岸風力機的開發，以及開發相關技術、投入直驅式發電機的廠商數目逐漸增加等。不管陸域或是離岸風力，均朝向大型化風力機發展，特別是在離岸風電。

風力機大型化是降低發電成本最有效的手段，根據顧問公司 MAKE Consulting 估計，2016~2025 年風力發電可以降低成本的方式中，風力機大型化可以降低發電成本的比例為 49.1%，其他所有方式合計可降低成本 50.9%。就開發商的角度而言，風力機如果性能、品質夠穩定，單機容量是越大越好，此需求將帶動風力機開發商投入更大容量的產品。不過就技術上的限制，越大型的風力機，技術困難度與需投入的研發資源亦隨之增加，因此僅有少數廠商有能力投入，未來產業集中度將更為提高。