

大型風力發電機組技術的發展趨勢

傅雷蒙¹ (Ramon Blasco-Gimenez)、謝宏毅² (Hung-I Hsieh)、林法正³ (Faa-Jeng Lin)

¹ 西班牙瓦倫西亞理工大學 自動系統工程學系

¹Dept. de Ingenieria de Sistemas y Automatica, Universidad Politecnica de Valencia

¹ E-mail: r.blasco@ieee.org

² 國立嘉義大學 電機工程學系

²Department of Electrical Engineering, National Chiayi University

² E-mail: hihsieh@mail.ncyu.edu.tw

³ 國立中央大學 電機工程學系

³Department of Electrical Engineering, National Central University

³ E-mail: linfj@ee.ncu.edu.tw

摘要

本文介紹大型風力發電機組的技術與發展趨勢，在迅速擴張和競爭加劇的環境背景下，本文分別探討包括葉片技術、風機組結構、控制、動力傳動、電力電子技術和電網整合的最新趨勢。

1、簡介

風力發電已逐漸成為整體電力需求的重要一部分，同時有助於二氧化碳的減少排放，表 1 中顯示幾個具有高風力裝機容量的國家，值得注意的是，中國和美國在其中為最高裝機容量的國家，而丹麥、葡萄牙和西班牙則顯示為具有最高風電比例的國家，而且每年電力需求均超過 17% 皆由風力發電而來。

表 1、風力發電裝機容量

	年消耗量 覆蓋率*	裝機容量 (MW)**
中國	1.2%	62,733
美國	2.3%	46,919
德國	6.0%	29,060
西班牙	16.4%	21,674
印度	--	16,084
法國	--	6,800
義大利	2.6%	6,747
英國	2.6%	6,540
加拿大	1.8%	5,265
葡萄牙	17.0%	4,083
丹麥	21.9%	3,802

* (2010)

** (2011)

風力發電裝置容量的增加是藉由不同國家所設定的再生能源策略所驅使，其目的是為了達成“歐洲 20-20-20”的目標而努力。在風力發電技術的不斷創新下，減少整體能源成本的目標已逐步達成，同時在政府實施降低財政支持的情況下，日趨嚴格的電網規範也已逐漸形成。除此之外，離岸型技術（Off-Shore）的研究工作對於風力發電技術產業的發展也存在著一個重要的驅策作用，儘管在 2011 年底，離岸風電設施在全球風力發電容量 238GW 中只佔 4.1GW，但其技術創新的可能性卻遠比向岸型技術（On-Shore）市場來的大。在這個背景下，重要如強調大型向岸型及離岸型技術潛力的國家如台灣，其風速在世界各國中屬最高風速 [1]，這使得在不久的將來，離岸型風力發電機組裝置將會大幅增加。

2、電網整合

圖 1 顯示西班牙 2012 年 4 月 19 日的風力發電量，圖 2 顯示風能負載的覆蓋百分比，風電產量大約佔據一整天總需求量的百分之五十左右，有時甚至會達到百分之六十一。值得注意的是，西班牙和葡萄牙的電力系統連接到歐洲的其他地方是很微弱不足的，連接到法國共 1.4GW，僅佔峰值功率的 3%。另一方面，西班牙的電力系統仍有約 4.9GW 需倚靠抽水蓄能式水力發電系統。在上述的一天之中，即使 61% 由風力發電所提供，主要和次要的電力控制系統並不會受由大型的風力發電所影響，最顯著的效應為風力預測誤差（Wind Prediction Error）和平衡成本（Balancing Costs）之間的相對關係，如圖 3 所示。

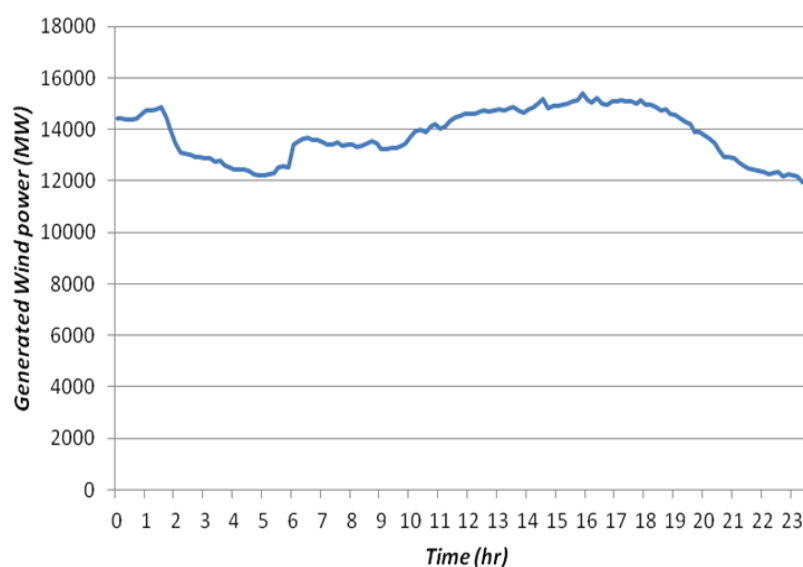


圖 1、西班牙的風力發電量（04/19/2012）

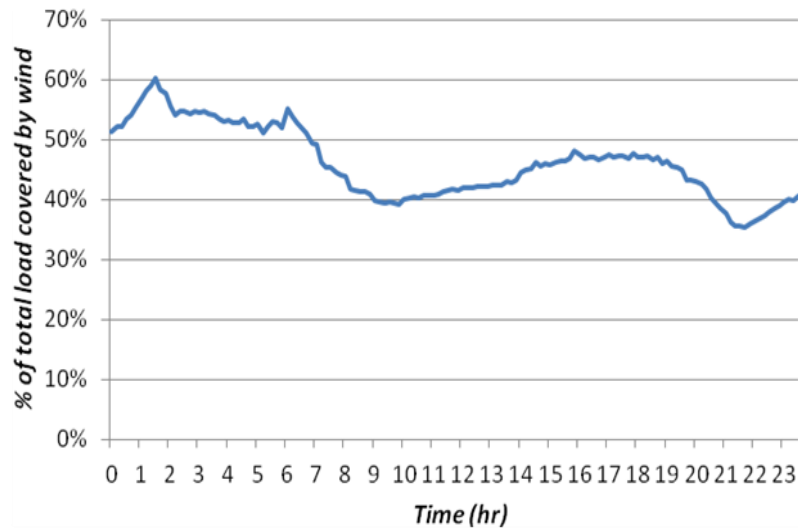


圖 2、風力發電占總需求量的百分比（04/19/2012）

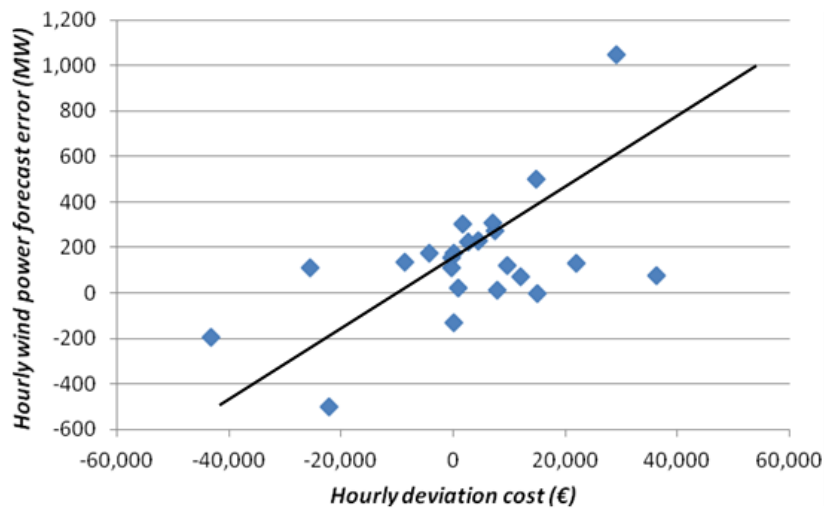


圖 3、每小時誤差成本（04/19/2012）

因此即使存在有非常大的風力發電比例，對於電力系統的整體影響性仍是非常的有限，然而在西班牙安裝風力發電機組，並於 2020 年前預計達到 35GW 的規畫目前仍在進行中，為了能夠達成容納此種功率需求的水平，新的抽水站蓄能式水力發電系統也已經在規劃進行中，此外另一條更為堅實的且連結到法國的輸電系統也正在設計和興建中。除了上述幾項基礎建設外，更嚴謹的電網規範以期能容納新增加的風力發電機組設備，也已正被納入設計考量中；舉例而言，最近歐洲輸電運營商聯盟(ENTSO-E)對於各類型的供電系統，包括風能和太陽能[2]，提出了新的發電機連接規範，值得注意的是，主頻率控制法則對於所有發電機系統皆適用，儘管低於 1MW 的發電機只需要提供向下的功率調節法則，如圖 4 之類型 A 所示，大型發電機也須提供向上的功率調節法則。

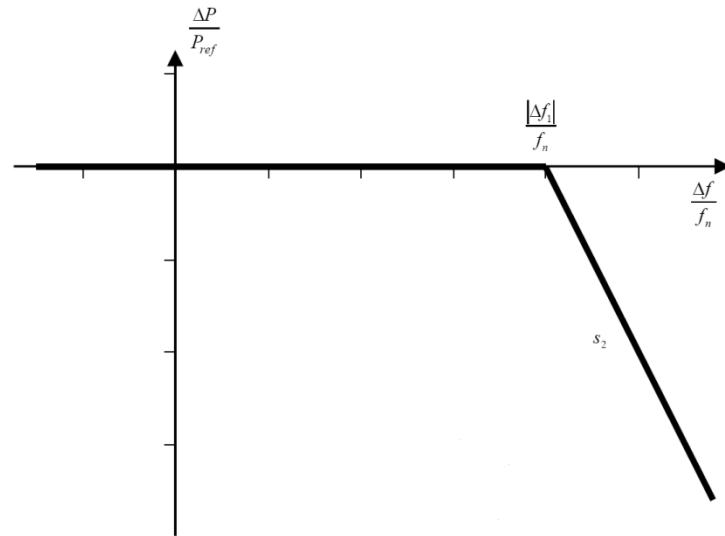


圖 4、類型 A，發電機之主頻率控制法則（低於 1MW）[2]

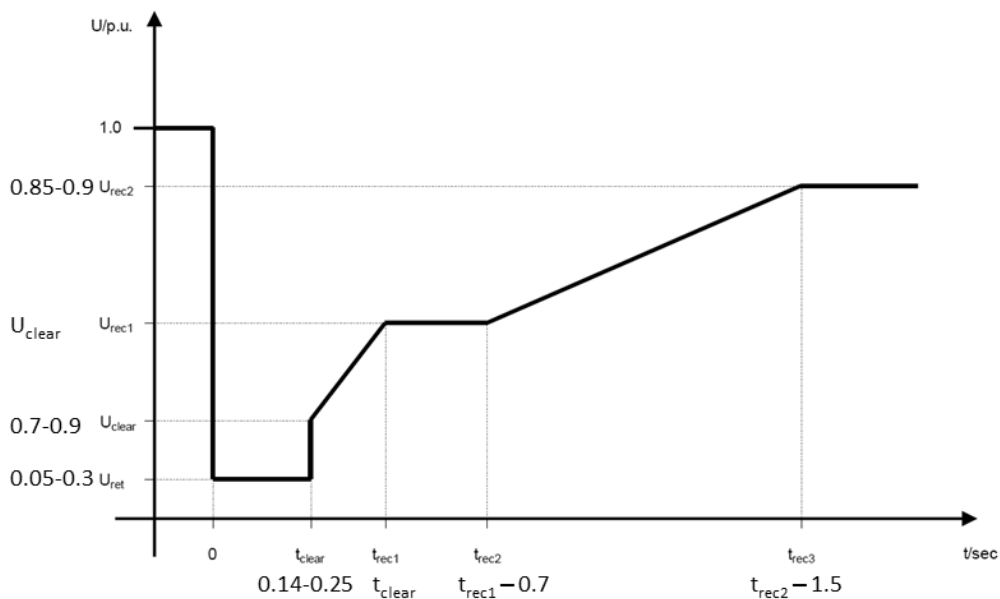


圖 5、類型 B，發電機之故障穿越表現（歐洲大陸同步電網區 1MW~50MW 而言）[2]

值得一提的是，所有的國家規章都必須遵守新的歐洲電網規章，然而每一國家的電力傳輸系統（TSO）存在有適度的靈活性，皆會以他們相對應的地區作多方面考量，並將新的歐洲電網規章運用到他們的相對應地區；例如，針對電網的故障穿越表現及慣性仿效系統而言。此外類型 C 和類型 D 的發電機（指在歐洲大陸大於 50MW 的系統、英國大於 10MW 的系統、波羅的海及北歐系統、愛爾蘭大於 5MW 的系統等），以及所有離岸型發電機應該都能夠依據 TSO 電力傳輸系統的需求性，進一步來執行孤島和電網黑啟動操作。由於這些需求面的產生，

以及同時採用電力電子技術在節能和降低能源消耗方面提供諸多貢獻，因此可使有效減少系統成本成為可能，也進一步促使許多廠商及業者採用電力電子全額定功率電源轉換器，以替代傳統的雙饋式感應發電機作為新一代風力發電機組的控制策略。

2.1、大型離岸式風電場的高壓直流傳輸整合

對於電力系統中大量整合風力發電技術而言，電力傳輸一向是一個重要的議題[3-4]，這類問題的一個可能的解決方式是採用高壓直流電力聯網（HVDC Links），從經濟的角度來看，當風電場坐落位置距離海岸線 50 公里以上，大型離岸風電場採用高壓直流輸電技術將可更優於高壓交流傳輸所帶來的經濟效益[5-6]。此外針對輸電限制的改進，歐洲和美國正迅速的研究採用多終端高壓直流聯網技術（Multi-Terminal HVDC Links）來解決上述的限制，並且將其研究應用在大型離岸風電場的連結[7-11]。目前在歐洲，新的高壓直流電力聯網技術正在積極策劃中，特別是在北海（如圖 6 所示）；同時在美國，320kV~2GW 的大西洋風力連結技術也在積極策劃中，尤其針對大型離岸風電場的電力聯網而言（如圖 7 所示）。相似的超級電網技術在亞洲也已被提出，並結合再生能源的技術作應用整合[12]。

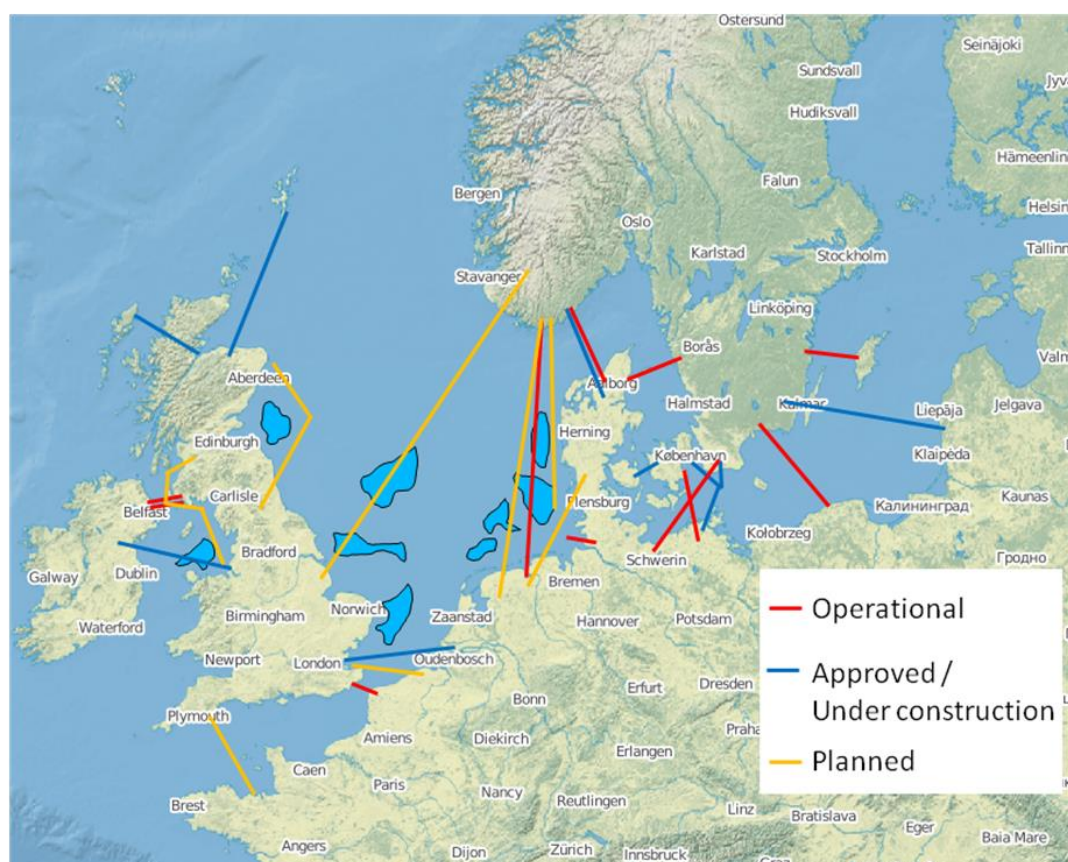


圖 6、歐洲核准與操作之離岸型高壓直流電力聯網，以及未來離岸風電場的開發規劃

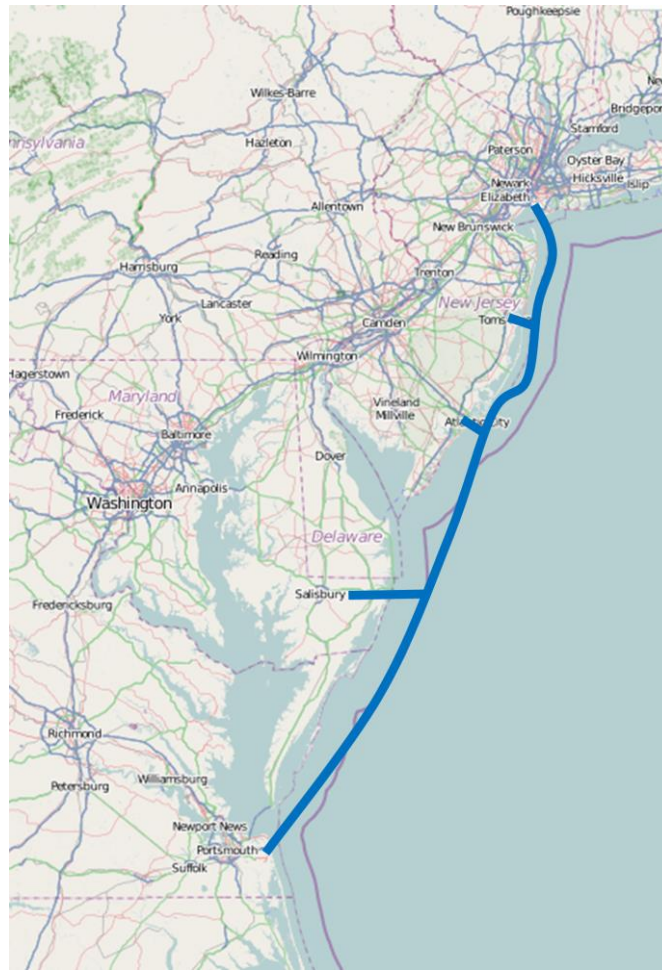


圖 7、美國大西洋大型離岸風電場的電力聯網示意圖

目前第一個高壓直流聯網連結到離岸風電場的設備為德國的 HVDC BorWin1 [13]，它將德國的電網連接到 400MW Borkum II 風電場，所使用的技術是採 ABB HVDC Light 公司所提供之電壓源高壓直流輸電控制策略（VSC-HVDC），當風力發電機組運轉於中速時，由 AREVA Wind 公司所有的永磁同步發電機組 M5000（5MW）提供操作。在第一個電壓源高壓直流輸電之離岸風機整流器結構中，VSC-HVDC 離岸整流器將會控制交流網路（Off-Shore AC-Network）與風力發電機組的電壓及頻率，此種控制法則類似向岸型技術（On-Shore）之風力發電機組控制策略，即如同藉由 HVDC 整流站所提供的交流電網一般十分強健且穩定[14-15]。然而某些解決方法已經被提出，例如使用 LCC-HVDC 聯網技術、風力發電機組的串聯連接技術[16-18]、混和型結構技術[19-23]、以及使用傳統二極體整流技術[24-26]等。我們將會描述每項技術的優缺點。

對於 LCC-HVDC 的聯網技術更勝於 VSC-HVDC 而言，其優點為較佳的可

靠性及追蹤紀錄、較低成本和更高的效率，然而它們需要被限制在離岸風電場進行操作。此問題的解決方法（包含風電場的控制）可依據孤島電網的概念來提供所需的強大電壓供應[24–26]。此外每一個風力發電轉換器的直流聯網串接技術，皆提供了降低轉換器的使用數目進而提升整體系統轉換效率的明確訴求[16–18]，然而其主要缺點為系統於可變電壓下操作，某種程度上可能會導致高壓直流電力傳輸的輸電損失，更重要的是，對於此串聯轉換器的隔離而言，在某些情況下會產生對於地的一個高電壓存在。

儘管新的拓撲架構已被逐一提出，但對於短期和中期的發展而言，電壓源高壓直流輸電策略仍是首選技術，並已被廣泛運用於之前所提及的電力聯網規劃中，其主要原因仍為效率的提升、可獲得更高的電壓轉換準位、相對容易的多終端高壓直流聯網技術和應用、可採用較便宜的 XPLE 電纜等。基於 HVDC BorWin1 的成功應用實例，另一項新的 BorWin2 HVDC 技術也正在發展中，並且目前正朝向更大功率等級 800MW 作發展考量。然而當前的風力發電技術若依靠高壓直流或高壓交流傳輸至電力聯網系統，則皆採用標準的獨立控制演算法則，但能夠想像在不久的將來，高壓直流傳輸聯網技術將會被逐漸開發並應用在新的風力發電控制系統。

3、轉子和葉片

對於一個給定功率的風力發電機組而言，其風機組直徑的增加有一恆定的趨勢，對於設計成適用於較高風速運轉型態的風機組而言，則可在風速較小的地方使用而不至於損壞，圖 8 顯示出不同的製造商之轉子尺寸。

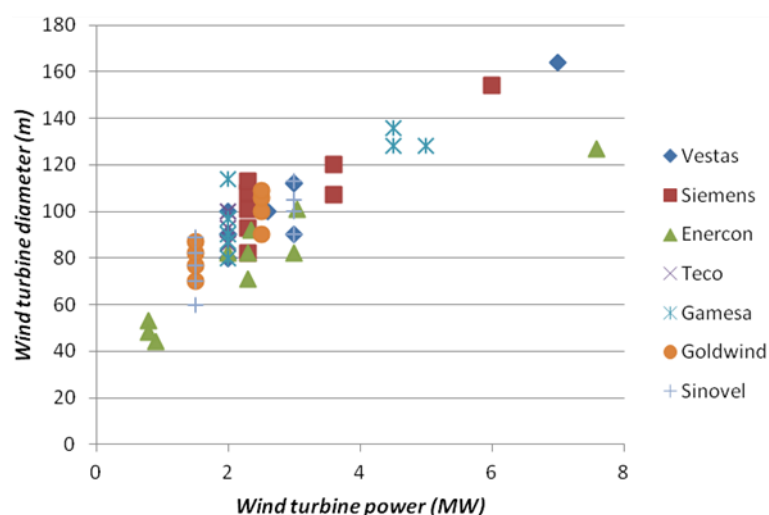


圖 8、不同廠商之風力發電機組直徑比較

然而使用新的材料和製造技術，可使風機葉片重量減輕且獲得更大的葉片尺

寸，一些製造商更選擇採用較為昂貴的碳纖維強化高分子複合塑料（環氧樹脂接著劑，CFRP），來取代常見的玻璃纖維強化塑料（GFRP）。為了降低且控制成本，碳纖維材料可以被用來在適當的地方減輕重量並負有高強韌力的使命（例如風機葉片的根尖處）。相對於使用內部接縫方式而言，一些製造商改採用先進的鑄造技術來生產風機葉片，據宣稱這個過程可以提供更嚴密的誤差檢視並獲得重量更輕的風機葉片。此外為了克服大型葉片在運輸方面的困難，一些廠商也採用兩分段式組裝成一大型風機葉片，此方式將能允許較大的葉片搬運及施工以作為向岸風機組裝使用，否則將無法被運送。

另一方面，在極大型 10MW 或以上之離岸風機葉片的設計方面，則呈現出一項重要的技術挑戰，無論從空氣動力或機組結構的角度來看，如此大型的風機葉片則需要提供不同阻尼的機械諧振模式，以及在較大的風速範圍內提供良好的空氣動力性能。目前已提出了幾項不同的選擇及替代方案，像是主動式空氣動力裝置的使用，例如渦流發電機[27-29]，或是在其他的技巧中採用空氣壓縮注入技術[29]。這些修改後的形式與目的是為了緩和及減輕風機葉片邊緣層的運轉表現，以及氣流分離時所帶來的延遲效應，並減少紊流產生和提高效率。

其他建議則包括有採用航空工業的空氣動力裝置，如襟翼和縫翼（Flaps and Slats）[30-32]，這些設備允許合適當地風力條件之類機翼形狀的風機葉片剪裁，進而獲得在較大風速範圍下更好的空氣動力效率，減少振動及將湍流的風速流量做更好的處理。然而襟翼和縫翼的使用，也意味著在風機葉片製造過程中的一項重要變化，此外直到製造過程逐漸成熟後，堅固性也是相當重要的；堅實性及耐久性對於離岸風力發電機組而言是一項重要的議題。

4、結構

目前於工業中使用的風力發電機架塔是採用柱狀鋼塔結構，一些製造商則選擇採用混合塔的結構，其機架塔的底部由混凝土製成，頂端則是柱狀鋼。這種方式降低了機架塔的成本，又同時可提升結構強度，以及更接近模組化設計的機架塔建構方式。又風力發電機架塔成本高的原因之一，是須提供風電機組足夠堅實且適當振動阻尼的支撐結構，因此為了精簡機架塔的建構需求，包括減少風輪轉子與機艙殼的重量，以及主動式和被動式的減振裝置[33-34]；所提出的建議包括採用磁流變阻尼器（Magneto-Rheological Dampers）[34-35]，包括磁性液體或粉末的使用，如此可以根據磁場的應用來改變其摩擦力特性。

離岸風電場的發展也促使了幾項海上基座發展的多方面選擇，對於風電場的建構成本而言，離岸風電場海上基座的建置則呈現了較高比例的花費，由於這些基座的使用有很大的程度取決於特殊氣候條件下，更重要的是須考慮海床深度及地質特徵。目前的技術包括使用單基樁式、三基樁式、護套式、重力式基礎等

[36-37]。表 2 包含了幾種離岸風電場的基座使用列表。

表 2、離岸風電場機組的基座使用列表

Wind Farm	Foundation	Depth (m)
Barrow	Monopile	15-20
Blyth	Monopile	6-11
Horns Rev	Monopile	6-14
Kentish Flats	Monopile	3-5
North Hoyle	Monopile	7-11
OWEZ	Monopile	17-20
Princess Amalia	Monopile	19-24
Scroby Sands	Monopile	13-20
Utgrunden	Monopile	6-15
Alpha Ventus	Jacket	30
Beatrice	Jacket	45
Alpha Ventus	Tripod	30
Lillgrund	Gravity base	4-13
Middlegrunden	Gravity base	3-6
Nysted	Gravity base	6-9
Thornton Bank	Gravity base	12-28
Tuno Knob	Gravity base	3-7
Vänern	Gravity base	1-22
Vindeby	Gravity base	2-4

有幾個國家具有相當好的海上風電資源，例如日本，但是他們靠近沿岸邊之海水深度卻非常的深，因此在這種情況下，使用浮動式風力發電機組將是非常有吸引力的，但是浮動式平台則會導致額外的負載（指陀螺儀和其他方面）。某些技術的提出則是藉由深海石油鑽井平台的概念得來，所提出的替代方案包括使用張力腿平台、大型平底船及壓艙漂浮物[38]。

建立在向岸型或非常鄰近岸邊的浮動式風力發電機組，尤指使用壓艙漂浮物，然後再受拖曳至安裝地點，可進而降低安裝成本。現今兩種安裝浮動式風力發電機組的方式，例如艙圓杆浮標設計(Hywind)和浮標式基座海上風機(WindFloat)兩者方案相互替代；包括安裝在頂柱的風力發電機組的一種動態平衡三基樁式浮標設計，海水經由每台風機柱內的底部柱床向上抽打，目的為保持漂浮體的穩定性及不受海況和風向影響，因此標準的離岸型風力發電機組可以採用。

上述兩者替代方案目前仍在測試階段，自 2009 年以來在挪威，一個 2.3MW

採用 Hywind 設計的西門子風力發電機組已被用來做測試，而在葡萄牙，另一個採用 WindFloat 設計的維斯塔斯（Vestas）2MW 風力發電機組也正被測試中。

5、控制

適當的控制策略比結構強化更能夠減少風力發電機組的疲勞性負載[39]，典型的轉矩控制技巧能被應用在低於額定速度的風力發電機組，以執行最大功率追蹤和可變螺距控制，如此在風力大時可被用來限制風電機組的運轉速度。一般而言，採用兩種不同的迴路控制方式，在做最大功率追蹤時限制可變螺距的最小角度，同樣地，在額定的速度下限制轉矩（或功率）給定需求。很明顯的，實際的控制還包括了一些附加的演算法，例如施加濾波器來避免某些振動模式的影響，以及採用個別的可變螺距控制以減少風切，或甚至減少在偏航誤差角存在的情況下，所造成的風機葉片和機架塔柱的負荷[40]。

另外多變量控制策略也能被使用，此時兩轉矩（或功率）和可變螺距的參考角度能被同時採用作為最大功率追蹤、速度控制和振動阻尼。這種控制策略已被證實存在於風紊流及風切情況下，風力發電機組的負載可被減緩[41-43]。然而多變量控制策略通常讓風力發電機組的參數變化更為敏感，更明確的說，由於磨損、溫度變化等因素，風機組的使用壽命和某些參數，則會因此而有所改變。此外對於特殊型與標準型風機組的控制器設計方面，其參數之間也可能會有顯著的差異。

一種可能的方式，是於一般正常操作模式下採用適應性控制策略，用以鑑別風力發電機組的模型，然後利用檢視的結果來進一步微調動態操作模式下的控制器設計[44]。由於初期的故障存在，一些參數預估可能超越某些容忍限度，這類的參數偏差可以作為一個初期的預警。從此觀點來看，在風力發電機組故障變得更加嚴重前，可以試著先將其安全地停止，或是降低風機組的操作功率直到初期的故障被修復[45]。這種適當地結合適應性及容錯控制，尤其對於離岸型風電場而言，遠比向岸型風電場來的困難及昂貴。

其他技術還包括進風量的測量，可採用一種風力感測器，例如雷達（LIDAR），可提供在風力發電機組前某一距離處，測量平均風速及紊流。經由一凝結紊流假說（Frozen Turbulence Hypothesis）的提出[46]，可變螺距控制器能夠被預先訂制和操作，並減少風機葉片和機架塔柱的負載。此種方法已經被追蹤了數年，但近年來更可靠的風力感測器已被提出，可使這方面的控制技術發展更為廣泛的在工業上被採用[39]，[47-48]。

適當的結合控制技巧和葉片技術的改變，可使風機葉片的負載減少，舉例而言若採用適當的控制技術[49]，相較於傳統式個別葉片控制技巧而言，可採用雙

風機斜葉片控制技術，亦即可將雙個風機斜葉片做同時考慮，應可減少約 13% 的風機葉片負載性疲勞。對於離岸式系統，尤指浮動式風力發電機組而言，則會使控制問題更加複雜，例如風力和潮汐力會影響風力發電機組的性能和運作等；顯然大多數新的機械性負載將會出現，其中有許多是由於陀螺效應的存在而產生，現今新的控制演算法則已被開發出來，可同時考慮風力和潮汐力的雙變化影響[50]。

除了風力發電機組的個別控制之外，特定風電場之風機尾流的產生對於風力發電機組的性能也將有顯著的影響；由於表面粗糙度降低和風切因素，會進而導致較長風機尾流的產生，這種效應對於離岸型風電場特別顯著。因此，一些高水平的控制策略已被導入來優化整體風電場的產電成效，而不僅只是優化個別或單一風力發電機組的產電情況[51]。另一種可能的解決方式包括採用浮動式風力發電機組，以及藉由浮體式風機位置的移動，來搬動迎風式風力發電機組的風機尾流[52]。

6、動力傳動

風電機組的動力傳動裝置係由一個多節變速器、雙饋感應發電機、以及部分額定功率轉換器所組成，此結構對於大型向岸式風力發電機組而言，是最為廣泛被採用的形式。然而一些因素的考量，因此導致相關製造商評估全額定功率轉換器的使用，亦即選擇採用降低成本且減少耗能，進而可達成效率提升之電力電子技術，以符合上述更嚴格的風電聯網要求。舉例而言，一些製造商提供搭載永磁同步發電機（PMSG）和全額定功率轉換器之風力發電機組，例如 Goldwind 公司採用大量極數的直驅式發電機，即擁有大幅減少風機艙整體重量的優勢，透過快速運動部件的消除及精簡，增進整體機構強度並強化主軸承，以增加機構的堅固性。

然而這種方式需要相對大量的永久磁鐵，它的成本對於稀土材料價格的波動是非常敏感的；一種方式來克服這種缺點，即使用中速或高速的永磁同步發電機來作替代。高速永磁同步發電機擁有較少數量的永久磁鐵之優點，因此它們對於磁鐵的價格波動較不敏感，此外風機齒輪箱和傳動系統也非常類似於傳統雙饋式感應發電機（DFIG），一些製造商更容易利用他們現有以雙饋式感應發電機為主的風電技術作為基礎，再移轉到永磁同步發電機的這類技術。

此外具有高齒輪比的風機齒輪箱不僅重量大且價格昂貴，並且可能對於風力發電機組的機構強度造成負面影響。一種取捨方式也是採用中速的永磁發電機和結構較為簡單的風機齒輪箱，在這種情況下儘管發電機內磁鐵使用的頻繁度大於在高速發電機的情況下（但仍低於直驅式發電機使用之極數），齒輪箱的設計和重量可較為簡化。另外直驅式發電機中的磁鐵可避免使用傳統同步發電機的直流

激磁，此即為 Enercon 公司的選擇。

為提升整體機構的強健性，採用多相發電機是一種可能的選擇，由於其擁有三相以上的結構，因此若在電力電子轉換器於單相或某一處發生故障的情況下，發電機依然能夠處於低功率情況下操作[53]。表 3 包括一些現行的製造商以及所能提供的動力傳動技術。

表 3、一些風力發電機組製造商提供之動力傳動技術特點

manufacturer	wind turbine	transmission	generator
Vestas	V164-7.0MW	2-stage	PMSG
Vestas	V90-3.0MW	3-stage	DFIG
Vestas	V100-2.6MW	3-stage	DFIG
Vestas	V112-3.0MW	3-stage	PMSG
onshore			
Siemens	SWT-6.0-154	Direct	PMSG
Siemens	SWT-2.3-82	3-stage	SCIG
Siemens	SWT-2.3-113	3-stage	PMSG
Enercon	E-126	Direct	EESG
Teco	TFC2000	3-stage	PMSG
Gamesa	G114	3-stage	DFIG
Gamesa	G128-4.5	2-stage	PMSG
Goldwind	GW109	Direct	PMSG
Goldwind	GW87	3-stage	DFIG
Sinovel	SL3000/113	3-stage	DFIG

7、電力電子

隨著風力發電機組所需之額定功率日趨增加，其所衍生的電力電子轉換器應用技術也已逐步成形，此外成本降低、可靠度提升和效率增加等考量因素，也已逐漸成為多兆瓦級大型風力發電機組之電源轉換器的選用依據。傳統而言，低電壓、背對背兩級式電源轉換器仍為適用於雙饋式感應發電機的標準形式，然而採用不同的選擇或替代方式，包括串聯補償裝置的使用[54]，則可再藉以改進風電系統之故障穿越表現。另一方面，新的轉換器架構也已陸續被提出，以利在全額定輸出功率下之效率提升；此外另一種替代方式，則可採用一電壓適中之多階層轉換器，也可得到換向損失減少，以及操作在更高電壓水平時，導通損失得到改善之優點。典型的轉換器結構，包括有三級型和五級型二極體箝位式電源轉換器[55-58]、模組化多階層轉換器[59-62]等，這些轉換器能提供效率高達 99.4% 以上之應用[61]。

另一種適用於多兆瓦級之大型風力發電系統電源轉換器，則採用低電壓並聯式背對背電源轉換器系統架構[63-64]，為了減少導通損失和換向損失，電源轉換器的使用需求及數量則隨時能夠依據風電機組所需之瞬時功率來提供能量；若藉由採用標準的電源轉換器模組，其效率可提升並接近於電壓適中之電源轉換器。其他的使用建議包括採用全額定或部分額定之電源轉換器，以矩陣轉換器為例[65-66]，但由於仍需考量元件衰老和可靠度等相關議題，因此這類轉換器通常不採用電解質電容；它們通常具有較高的損失和矩陣轉換器常有的故障穿越情況。中間儲能元件的缺乏，同時也意味著對於所有電網發電機的電流和電壓有瞬間且直接的影響。對於這些問題而言的一個可能的解決方式，是採用間接式矩陣轉換器，其變動的直流電壓鏈能夠被用來減少損失，也同時包括減少制動電阻的能源損耗[67]。

8、結論

本文針對大型風力發電機組之發展趨勢提供相關技術及資料參考，在現今競爭日趨激烈的環境背景下，降低整體能源成本、進而減少需求面的補貼則是技術變革與精進的最主要驅策力。此外隨著風電場穿透功率的增加，也導致日趨嚴格的電網規範逐步形成，同時藉由大量的離岸風電場之安裝運作，對於風力發電技術的迅速發展也提供一個強大的助力。很顯然這將導致以減少能源成本為主的一項新的發展趨勢，從較接近市場水平的向岸式風電場，發展到更加成熟的離岸式風電技術，預計在 2020 年間風力發電則可為市場提供約 30% 左右的電價下降空間[68]。

REFERENCES

- [1] T.-H. Yeh and L. Wang, "A Study on Generator Capacity for Wind Turbines Under Various Tower Heights and Rated Wind Speeds Using Weibull Distribution," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 23, no. 2, pp. 592–602, Jun. 2008.
- [2] European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E), "ENTSO-E Network Code for Requirements for Grid Connection Applicable to all Generators." Jul-2012.
- [3] C.-J. Lin, O. S. Yu, C.-L. Chang, Y.-H. Liu, Y.-F. Chuang, and Y.-L. Lin, "Challenges of wind farms connection to future power systems in Taiwan," Renewable Energy, vol. 34, no. 8, pp. 1926–1930, Aug. 2009.
- [4] C. J. Lin, S. Y. Oliver, C. L. Chang, Y. H. Liu, and Y. F. Chuang, "Transmission System Planning for Renewable Energy Developments in Taiwan," in 2009 CEO Conference of the Association of the Electricity Supply Industry of East Asia and the Western Pacific, Kaohsiung, Taiwan, 2010, pp. 1–7.
- [5] L. P. Lazaridis, "Economic Comparison of HVAC and HVDC Solutions for

Large Offshore Wind Farms under Special Consideration of Reliability,” Master, Royal Institute of Technology Stockholm, 2005.

- [6] Chih-Ju Chou, Yuan-Kang Wu, Gia-Yo Han, and Ching-Yin Lee, “Comparative evaluation of the HVDC and HVAC links integrated in a large offshore wind farm - an actual case study in Taiwan,” in 2011 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), 2011, pp. 1–8.
- [7] J. De Decker and A. Woyte, “Review of the various proposals for the European offshore grid,” *Renewable Energy*, no. 0, 2012.
- [8] G. D. Irwin, A. Isaacs, and D. Woodford, “Simulation requirements for the Atlantic Wind Multi-Terminal VSC Offshore Wind Project,” in *Transmission and Distribution Conference and Exposition (T D)*, 2012 IEEE PES, 2012, pp. 1–4.
- [9] D. Van Hertem and M. Ghandhari, “Multi-terminal VSC HVDC for the European supergrid: Obstacles,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 9, pp. 3156–3163, Dec. 2010.
- [10] [J. W. Feltes, B. D. Gemmell, and D. Retzmann, “From Smart Grid to Super Grid: Solutions with HVDC and FACTS for grid access of renewable energy sources,” in 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011, pp. 1–6.
- [11] T. J. Hammons, V. F. Lescale, K. Uecker, M. Haeusler, D. Retzmann, K. Staschus, and S. Lepy, “State of the Art in Ultrahigh-Voltage Transmission,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. 2, pp. 360–390, Feb. 2012.
- [12] S. Taggart, G. James, Z. Dong, and C. Russell, “The Future of Renewables Linked by a Transnational Asian Grid,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. 2, pp. 348–359, Feb. 2012.
- [13] P. Bresesti, W. L. Kling, and R. Vailati, “Transmission expansion issues for offshore wind farms integration in Europe,” in *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2008., 2008, pp. 1–7.
- [14] Shuhui Li, T. A. Haskew, and Ling Xu, “Control of HVDC Light System Using Conventional and Direct Current Vector Control Approaches,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 12, pp. 3106–3118, Dec. 2010.
- [15] X. Chen, H. Sun, X. Yuan, J. Wen, N. Li, L. Yao, and W.-J. Lee, “Integrating wind farm to the grid using hybrid multi-terminal HVDC technology,” in 2010 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS), 2010, pp. 1–6.
- [16] A. Prasai, Jung-Sik Yim, D. Divan, A. Bendre, and Seung-Ki Sul, “A New Architecture for Offshore Wind Farms,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 3, pp. 1198–1204, May 2008.
- [17] A. Garces and M. Molinas, “A control strategy for series connected offshore wind turbines,” in 2011 IEEE Ninth International Conference on Power

Electronics and Drive Systems (PEDS), 2011, pp. 1106 –1111.

- [18] A. Garcés and M. Molinas, “Coordinated control of series-connected offshore wind park based on matrix converters,” *Wind Energy*, p. n/a–n/a, 2011.
- [19] X. Chen, H. Sun, J. Wen, W.-J. Lee, X. Yuan, N. Li, and L. Yao, “Integrating Wind Farm to the Grid Using Hybrid Multiterminal HVDC Technology,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, no. 2, pp. 965 –972, Apr. 2011.
- [20] Li Wang, Wei-Jen Lee, Jon-Ruey Wu, Su-Jen Chen, Jen-Hang Kang, Chun-Yu Lin, and Yi-Shuang Huang, “Performance analysis of a large-scale hybrid offshore wind and marine-current farm connected to a power grid via an HVDC link,” in *North American Power Symposium (NAPS)*, 2010, 2010, pp. 1–8.
- [21] W. Pan, Y. Chang, and H. Chen, “Hybrid Multi-terminal HVDC System for Large Scale Wind Power,” in *Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE '06. 2006 IEEE PES, 2006*, pp. 755–759.
- [22] P. Cartwright, L. Xu, and C. Sasse, “Grid Integration of Large Offshore Wind Farms Using Hybrid HVDC Transmission,” *Proceedings of the Nordic Wind Power Conference, Gothenburg, Sweden, March*, pp. 1–2, 2004.
- [23] B. R. Andersen and Lie Xu, “Hybrid HVDC system for power transmission to island networks,” in *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2003 IEEE PES, 2003*, vol. 1, pp. 55–60 Vol.1.
- [24] R. Blasco-Gimenez, S. Añó-Villalba, J. Rodríguez-D’Derlée, S. Bernal-Perez, and F. Morant, “Diode-Based HVdc Link for the Connection of Large Offshore Wind Farms,” *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 2, pp. 615 –626, Jun. 2011.
- [25] R. Blasco-Gimenez, S. Añó-Villalba, J. Rodríguez-D’Derlée, S. Bernal-Pérez, and F. Morant, “Connection of Large Off-Shore Wind Farms Using Diode Based HVDC Links,” in *Wind Energy Conversion Systems. Technology and trends*, London: Springer-Verlag, 2012.
- [26] R. Blasco-Gimenez, S. Añó-Villalba, J. Rodríguez-D’Derlée, F. Morant, and S. Bernal-Perez, “Distributed Voltage and Frequency Control of Offshore Wind Farms Connected With a Diode-Based HVdc Link,” *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 25, no. 12, pp. 3095–3105, 2010.
- [27] E. V. Anjuri, B. Nanukuttan, J. Loganathan, and S. Herr, “Vortex generator assembly for use with a wind turbine rotor blade,” *U.S. Patent EP239982528-Dec-2011*.
- [28] B. Fang, S. Herr, and X. Liu, “Wind turbine blades with aerodynamic vortex elements,” *U.S. Patent 804780101-Nov-2011*.
- [29] S. J. Johnson, J. P. Baker, C. P. van Dam, and D. Berg, “An overview of active load control techniques for wind turbines with an emphasis on microtabs,” *Wind*

Energy, vol. 13, no. 2–3, pp. 239–253, 2010.

- [30] T. Behrens, L. H. I. Lim, T. Lim, C. K. Lim, T. B. A. Lim, K. L. Chong, W. G. Kim, Y. C. G. Chang, and L. W. Ken, “Control of Wind Turbine Blade Lift Regulating Means,” U.S. Patent United States Patent Application 2012022496509-Jun-2012.
- [31] P. B. Andersen, L. Henriksen, M. Gaunaa, C. Bak, and T. Buhl, “Deformable trailing edge flaps for modern megawatt wind turbine controllers using strain gauge sensors,” *Wind Energy*, vol. 13, no. 2–3, pp. 193–206, 2010.
- [32] T. k. Barlas, G. j. van der Veen, and G. a. m. van Kuik, “Model predictive control for wind turbines with distributed active flaps: incorporating inflow signals and actuator constraints,” *Wind Energy*, vol. 15, no. 5, pp. 757–771, 2012.
- [33] M. A. Lackner and M. A. Rotea, “Passive structural control of offshore wind turbines,” *Wind Energy*, vol. 14, no. 3, pp. 373–388, 2011.
- [34] A. Rodriguez Tsouroukdissian, “System And Method For Damping Vibrations In A Wind Turbine,” U.S. Patent Application US 2012/012143A1.
- [35] A. Rodríguez T., C. E. Carcangiu, I. Pineda, T. Fischer, B. Kuhnle, M. Scheu, and M. Martin, “Wind Turbine Structural Damping Control for Tower Load Reduction,” in *Civil Engineering Topics, Volume 4*, vol. 7, T. Proulx, Ed. Springer New York, 2011, pp. 141–153.
- [36] J. A. Schneider and M. Senders, “Foundation Design: A Comparison of Oil and Gas Platforms with Offshore Wind Turbines,” *Marine Technology Society Journal*, vol. 44, no. 1, pp. 32–51, 2010.
- [37] M. Bilgili, A. Yasar, and E. Simsek, “Offshore wind power development in Europe and its comparison with onshore counterpart,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 2, pp. 905–915, Feb. 2011.
- [38] A. Myhr, F. E. Hansen, U. Moeller, and T. A. Nygaard, “A comparison of existing and conceptual designs for floating wind turbines,” Jul. 2010.
- [39] E. Bossanyi, B. Savini, M. Iribas, M. Hau, B. Fischer, D. Schlipf, T. van Engelen, M. Rossetti, and C. E. Carcangiu, “Advanced controller research for multi-MW wind turbines in the UPWIND project,” *Wind Energy*, vol. 15, no. 1, pp. 119–145, 2012.
- [40] H. Namik and K. Stol, “Individual blade pitch control of floating offshore wind turbines,” *Wind Energy*, vol. 13, no. 1, pp. 74–85, Jan. 2010.
- [41] B. Boukhezzar, L. Lupu, H. Siguerdidjane, and M. Hand, “Multivariable control strategy for variable speed, variable pitch wind turbines,” *Renewable Energy*, vol. 32, no. 8, pp. 1273–1287, Jul. 2007.
- [42] “LPV H-infinity controller design for variable-pitch variable-speed wind turbine,” pp. 2222–2227, May 2009.

- [43] C. L. Bottasso, A. Croce, D. Devecchi, C. E. D. Riboldi, and Y. Nam, "Multi-layer control architecture for the reduction of deterministic and non-deterministic loads on wind turbines," *Wind Energy*, 2011.
- [44] M. Iribas and I. D. Landau, "Identification of wind turbines in closed-loop operation in the presence of three-dimensional turbulence wind speed: torque demand to measured generator speed loop," *Wind Energy*, vol. 12, no. 7, pp. 660–675, 2009.
- [45] J. K. Ong, T. L. Zhang, Y. Zhou, K. P. Lim, W. Y. Chen, P. Y. Siew, K. K. R. Nandedkar, J. Y. Ho, and B. C. Chin, "Method and a system for controlling operation of a wind turbine," U.S. Patent Application 12/820,194.
- [46] D. Schlipf, D. Trabucchi, O. Bischoff, M. Hofsäls, J. Mann, T. Mikkelsen, A. Rettenmeier, J. Trujillo, and M. Kühn, "Testing of frozen turbulence hypothesis for wind turbine applications with a scanning LIDAR system," in *International Symposium for the Advancement of Boundary Layer Remote Sensing*, 2010.
- [47] D. A. Smith and M. Harris, "Wind turbine control having a lidar wind speed measurement apparatus," U.S. Patent 728189116-Oct-2007.
- [48] T. Mikkelsen, K. H. Hansen, N. Angelou, M. Sjöholm, M. Harris, P. Hadley, R. Scullion, G. Ellis, and G. Vives, "Lidar wind speed measurements from a rotating spinner," in *2010 European Wind Energy Conference and Exhibition*, 2010.
- [49] "Design limits and solutions for very large wind turbines." Project UpWind Report, Mar-2011.
- [50] T. Fischer, P. Rainey, E. Bossanyi, and M. Kühn, "Study on Control Concepts suitable for Mitigation of Loads from Misaligned Wind and Waves on Offshore Wind Turbines supported on Monopiles," *Wind Engineering*, vol. 35, no. 5, pp. 561–574, Oct. 2011.
- [51] M. Kristalny and D. Madjidian, "Decentralized feedforward control of wind farms: prospects and open problems," in *Proceedings of the Joint IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, 2011.
- [52] P. DUPIN DE LA GUERIVIERE, "INSTALLATION AND METHOD FOR EXPLOITING WIND ENERGY," U.S. Patent Application WO201206622325-May-2012.
- [53] E. Levi, "Multiphase Electric Machines for Variable-Speed Applications," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 55, no. 5, pp. 1893 –1909, May 2008.
- [54] P. S. Flannery and G. Venkataramanan, "A Fault Tolerant Doubly Fed Induction Generator Wind Turbine Using a Parallel Grid Side Rectifier and Series Grid Side Converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 3, pp.

1126 –1135, May 2008.

- [55] J. Rodriguez, S. Bernet, P. K. Steimer, and I. E. Lizama, "A Survey on Neutral-Point-Clamped Inverters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 7, pp. 2219 –2230, Jul. 2010.
- [56] X. Juankorena, I. Esandi, J. Lozano, and L. Marroyo, "Control of a full-converter Permanent Magnet Synchronous Wind Generator with Neutral Point Clamped converters during a network fault," in *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2010, pp. 3203 –3209.
- [57] K. Ma and F. Blaabjerg, "Loss and thermal redistributed modulation methods for three-level neutral-point-clamped wind power inverter undergoing Low Voltage Ride Through," in *2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2012, pp. 1880 –1887.
- [58] K. Ma and F. Blaabjerg, "Thermal optimised modulation methods of three-level neutral-point-clamped inverter for 10 MW wind turbines under low-voltage ride through," *IET Power Electronics*, vol. 5, no. 6, pp. 920 –927, Jul. 2012.
- [59] S. Kouro, M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Pou, L. G. Franquelo, B. Wu, J. Rodriguez, M. A. Perez, and J. I. Leon, "Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel Converters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 8, pp. 2553 –2580, Aug. 2010.
- [60] M. A. Parker, C. Ng, and L. Ran, "Fault-Tolerant Control for a Modular Generator-Converter Scheme for Direct-Drive Wind Turbines," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 305 –315, Jan. 2011.
- [61] R. Marquardt, "Modular Multilevel Converter topologies with DC-Short circuit current limitation," in *2011 IEEE 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE ECCE)*, 2011, pp. 1425 –1431.
- [62] A. J. Korn, M. Winkelnkemper, P. Steimer, and J. W. Kolar, "Direct modular multi-level converter for gearless low-speed drives," in *Proceedings of the 2011-14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2011)*, 2011, pp. 1 –7.
- [63] R. G. Wagoner, A. M. Ritter, and A. M. Klodowski, "Wind turbine with parallel converters utilizing a plurality of isolated ...," U.S. Patent 793995910-May-2011.
- [64] Z. Xu, R. Li, H. Zhu, D. Xu, and C. C. H. Zhang, "Control of Parallel Multiple Converters for Direct-Drive Permanent-Magnet Wind Power Generation Systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 3, pp. 1259 –1270, Mar. 2012.
- [65] R. Cárdenas, R. Peña, J. Clare, and P. Wheeler, "Analytical and Experimental Evaluation of a WECS Based on a Cage Induction Generator Fed by a Matrix Converter," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 1, pp.

204–215, Mar. 2011.

- [66] J. Kang, N. Takada, E. Yamamoto, and E. Watanabe, “High power matrix converter for wind power generation applications,” in 2011 IEEE 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE ECCE), 2011, pp. 1331–1336.
- [67] R. Pena, R. Cárdenas, E. Reyes, J. Clare, and P. Wheeler, “A topology for multiple generation system with doubly fed induction machines and indirect matrix converter,” *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 56, no. 10, pp. 4181–4193, 2009.
- [68] “Offshore Wind Cost Reduction Task Force Report.” Jun-2012.