



探討歐洲風電發展 降低臺灣學習風險

丹麥商凱得股份有限公司台灣分公司負責人 / 徐瑋克

關鍵字：風資源量測、風能分析、計算流力、風機大型化、專案風險

摘要

風電產業在經過四十年的演變，從陸域開始到近二十年的離岸風電，各項工程技術已逐步可以適應在全球各主要經濟體進行大規模的開發與營運。然而，由於氣候預估與風資源分析仍有很多的進步空間之下，如何建置風資源模型並結合當今電腦運算技術，便成為各大再生能源公司很重要的課題，以釐清風資源對於風場規劃與技術的風險，更能精準掌握財務投資方向。本公司在風電及再生能源工程顧問領域持續深耕並藉由參與全球各地風場實際經驗下，提供相關經驗與業界分享。

一、前言

近年歐洲各國紛採競價制度以降低風電發展與開發成本，各開發商面臨利潤被大幅減縮的財務壓力，以及因場址複雜而日益增加的資本支出下，均專注在計算流體

力學（Computational Fluid Dynamics，下稱CFD）的應用，以釐清風資源與風機及其附屬結構的相關交互作用。CFD在過去經常被低估和忽略，卻是上述問題最為直覺且重要的解決之道。

二、風資源分析

（一）採用 CFD 於實際應用之好處

我們的研究結果顯示，CFD技術應用在風場建造前的風能分析將能提高預測準確率，影響專案投資報酬率達30倍以上。此外，CFD技術更能優化風機排列組合，並確保風資源測量儀器擺放位置的正確及適當性。

尤其在複雜地理環境情況下，CFD風能分析有利於降低場址選擇不確定性且避開潛在不利區域。一般而言，在風能分析增加CFD的投資，僅占風能分析極小比例的資本



支出，但對於風場未來表現、銀行融資條件卻有極顯著的正面影響。

假設我們要開發一個小規模、地勢相對平緩及具若干林地環繞之風場專案，現場已建置一座70公尺高之測風塔，並預計設立五架風力機組。為解釋CFD應用，對於財務假設及風險預測之影響，試將以下使用和不使用CFD的風能分析結果做比較如下。如下圖1所示，即便於地形平緩場址，利用CFD技術執行風能分析能提供顯著效益，包含降低風資源分析0.5%的不確定性，更提高了0.9%的P90/P50發電量信心指數，以額外支出4仟英鎊的CFD分析之下，專案就會因為相關融資信心指數提升而使專案額外獲益達12萬英鎊。雖然說這是一個基於歐洲在銀行熟悉風電技術與融資架構下的基本假設，然而可說明的是採用CFD分析確實會增加相關技術與

財務對於專案假設的信心指數。

CFD風能分析之效益在於，隨著專案風險降低，融資銀行信心得以提升，並進一步，得到更為優惠融資條件或減少對股權結構衝擊。進一步而言，如在規模較小且平緩地勢都能具有明顯改善，更遑論於規模擴大或地勢更為複雜時，其帶來之助益則越發顯而易見。

（二）何謂 CFD 與傳統分析模型之差異

CFD分析技術能夠提供更為準確之結果，主要因其能正確地模擬風場周遭地形所產生之紊流和變化，這和傳統模型中採用大量近似值有非常顯著之區別。

並且，透過CFD建立之風場三維模型，

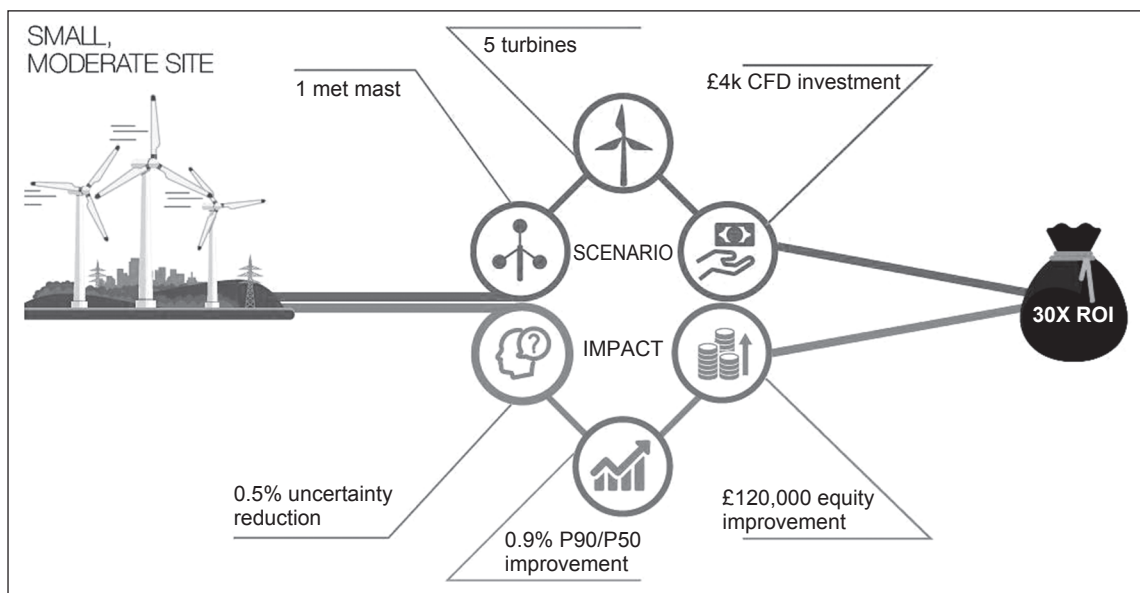


圖 1 利用 CFD 技術執行風能分析能提供顯著效益



能夠全方位地模擬風場周遭細部特性，視覺化模型的呈現方式則有利於專案利害關係人提升對於風能狀況之理解與溝通。

整體而言，CFD在風能預測和分析上優異的準確性能降低專案風險，並藉此提升專案利害關係人對於風場開發更深入的了解而大幅擴大風場開發的商業可行性。

K2 Management丹麥商凱得股份有限公司英國分公司之分析部門之研發總監Joel Manning表示：「只需幾千歐元的CFD分析就可以幫助開發商實現一個風能表現良好且穩定之風場。藉由使用雲端運算科技，我們已經能夠快速建構出一個風場專案的CFD模擬分析，這是在開發前期工作中一件不可或缺之工作項目。我們的預測模型經過多個風場且反覆可靠的驗證，並與實際運轉數據交叉比對，顯示我們所發展的CFD模型準確度非常出色。」

「在風場開發初期能夠越早使用CFD分析，對於專案效益的提升是明顯正向的，因為其不僅能夠運用於前期風資源量測的工作規劃，更能優化風機排列與佈置，進一步降低專案風險。」隨著風場專案的利潤漸為縮減，能儘早在開發前期引進CFD分析技術，無疑將為各利害關係人、開發商、融資銀行等提供更高投資報酬的機會。

三、風資源分析驗證風機性能曲線

日常生活中，在評估購買新車時，車商的油耗數據通常只會當作評估的一項特性，而那些數字往往無法在現實生活中呈現的，因為只有極少數的極理想狀態下才能達成。

風機製造商提供之功率曲線也是同樣道理，因為這些數字通常是在平坦、無林蔭干擾之測試場址中測量而來。而如何預測風機表現及虛擬曲線與現實的落差，這就會需要詳盡的風能分析規劃。

全球風力發電專案已經越來越難以找到理想之風機安裝地點，因為許多優良場址早已被使用，或者由於土地租賃條件、電網併聯等問題而不適於開發。意即風機並不一定能達到其所聲稱的發電量，這些型錄上之功率曲線及後續收益估計通常較樂觀。

而要預測風機在特定地點之實際表現，其實非常困難。每個場址的風況會受到各種因素影響；樹木、山坡、陡坡、風向及大氣條件，以及高度，密度和位置所影響。

在分析超過1,000個遍布全球各地的風場場址後，K2 Management觀察到各場址中程度不一的預測誤差，即一般業界存在大約5-10%發電量高估的問題。對於一個50 MW的風場專案，意味每年將短缺13 GWh（百萬度）的發電量。而這個缺口需要透過風機模擬技術的改善，來彌補其上述缺口。

開發商如果想得到更符合現狀之數據表現，且得到更為精準之預測結果，必須將多種因素納入考慮，包括風速、紊流和風切等相關數據。即使若干風機製造商提供特定場址情況下所產出之功率曲線，這些曲線也僅能反映出在特定條件下的性能，而無法反映實際風場條件下，風機之表現狀況。

如圖2所示，K2 Management藉由結合多

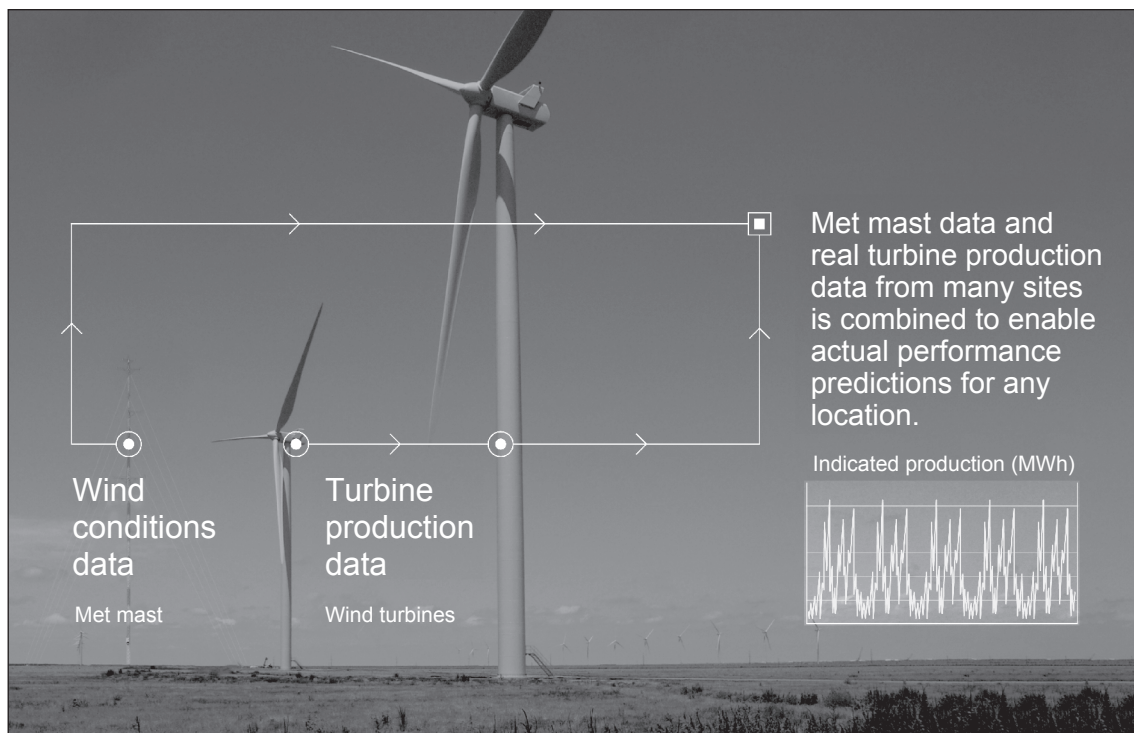


圖 2 預測模型

年實際經驗與優化分析，從風資源測量結果及風機發電數據兩方向同時累積數據並交叉進行比對，且運用空氣動力學理論，建立起一累積全球之大型資料庫之因果關係模型。至今，我們已經蒐集來自全球多個風場專案100多種形式的風機數據，並開發一個通用且準確之預測模型。隨著我們評估的專案項目越多，我們的模型也就越臻於完善。

簡言之，我們將當地風資源測量結果與CFD計算流體力學技術相結合，以了解風力在每個預定風機位置的實際表現。而後再將這些結果導入到我們的預測模型，來預測各個風機位置之發電產量，這比起單純檢視發電機之功率曲線來的更加精準。

對客戶而言，這技術通常能使發電量預估之準確度提升2%左右。而根據具體情況，其實際數據藉此向上或向下微幅調整。

如同一位我們的客戶所言：「在發電量分析上，這個業界就屬K2 Management最為傑出，或許有少數競爭者能夠稍微接近，但他們仍是業界最佳。」

然而風資源量測的數據收集，也會影響後續的分析結果。新型的風速計可顯著降低發電量預測不確定性，有時即便一個細微零件的調整都能引發巨大之變化。所以風力發電機功率曲線之驗證測試將被這項新設備改善。



為符合國際電工協會IEC之標準，風速計的技術已日趨完善，且使用之不確定性亦持續降低。這也代表風場業主在檢查風力發電機功率曲線數據時，可以藉此獲得更準確量測數字。

功率曲線驗證測試的量測，通常包含架設測風塔，並於塔上安裝風速計，接著進行至少3-4個月的觀測以收集風力數據。

然而，要能驗證風中的功率輸出仍相當困難，各種不同的條件皆會影響所收集數據之不確定性，如溫度，濕度和氣壓。因此要

提高數據準確性，就需要投入更為巨量之觀測資料。

K2 Management的預測模型中包括16個參數，而在其中，風速計扮演著重要的角色。我們研究結果顯示，若選擇正確之風速計及預測模型，在P50情況下，年發電量預測（Annual Energy Production）的總體不確定性將降低至少15%，其取決於當地平均風速和地形的複雜度。

下圖3為近期我們在亞洲之陸域風電案例，您可以看到，比起現行的舊型風速計，

Average wind speed	Old class anemometer	New class anemometer		
m/s	uncertainty %	uncertainty %	difference % point	difference %
4	15.5	13.1	-2.4	-15.7
5	10.6	8.7	-1.9	-17.6
6	8.0	6.5	-1.5	-18.6
7	6.4	5.2	-1.2	-18.3
8	5.2	4.3	-0.9	-18.1
9	4.5	3.7	-0.8	-17.0
10	3.9	3.3	-0.6	-15.0
11	3.5	2.9	-0.6	-16.1

Source: K2 Management

圖3 陸域風電案例



新型風速計之不確定性數據顯著較低，在中低風速之地區，這樣的數據差異則更加明顯。

四、風機運維風險

在風資源分析與風機表現藉由各種工具降低不確定性之後，更重要的就是如何確保風場運營之可利用率（Availability），以達到原先預估之發電目標，而對業主來說可用率一直都是一個投資收益的不安定因素。

然而，一個成功的專案取決於最後併網到電網的發電量有多少，而不是風機一年中可以正常運轉多少時間。

即便如此，大部分的風場擁有者都只在乎風機可用率數據，卻沒有對風機實際表現、其他輔助電力設施及電網之間管理給予足夠之重視。試問，如果今天變電站故障的話，這些風機還能有什麼發電能力？

隨著市場面臨躉購費率價格下降，運維指標必須改採與發電量連結之指標，以衡量專案績效。

這些案例包含以下：

1. 發電量或收益的可用率
2. 平均維修時間
3. 平均故障間隔時間
4. 備品到貨的準備時間
5. 遠端維修率
6. 維護成本/MWh

有人可能會覺得，這道理相當顯而易見。但一個所謂好的專案投資計畫需要在價

值、成本和風險之間找到完美的平衡，並充分理解其長短期之投資策略目標。

最完美的假設是，再生能源專案的投資者與開發商，都能有效評估專案相關風險。而風險總以各種形式出現：技術故障、場址通行受阻、證照許可問題、紀錄不良承包商和未知的售電價格。大多數時候我們都可以透過紮實的專案管理、合約管理以及技術風險敏感性分析，來進行模擬乃至減緩風險。

然而，個案問題並不能一體適用於其他專案。大部分時候，各國設置條件差異甚大，如地緣政治風險、法律風險、貨幣風險和信用評級等都是影響融資和獲利的關鍵因素。

在為開發商和投資者提供技術服務、財務諮詢和專案管理同時，我們一次次觀察到，若能讓我們在早期即加入專案開發，就能對專案投資報酬率產生重大影響。

尤其是對於選擇個別分包策略、主導專案開發過程的開發商而言，若他們將業務由EPC統包商統一處理，便會失去降低專案工程造价的彈性空間。根據我們在全球1,000多個專案經驗，陸域風電專案會預留的緩衝準備金額，依其設置地點的不同約為1%到6%之間。

（一）風險控管

一般而言，投資者和開發商在選擇專案地點時，首重權衡政治風險，因為一個不穩定的政府，可能會藉由提出政策、法規變動等衝擊再生能源專案。在新興及發展中國



家，其低GDP成長率和匯率波動也可能對投資報酬率產生重大影響。

即便在專案融資中已經建立起多種風險控管或風險對沖之工具，但在某些情況下風險並不一定能夠完全被預測及控制。因此建議投資者和開發商在架構財務模型假設時，應預留一定之緩衝空間。

（二）以分包策略降低預留之緩衝準備金

紐約大學史騰商學院財金教授Aswath Damodaran曾提出，以調整後之信用違約交換計算該國家風險溢酬，而在風險較高的區域，可應用計算再生能源專案所需的股權溢酬。

風險與獲益間之權衡，是現代投資組合理論的簡單觀念。一個違約風險高之國家需

要提供高利率來吸引投資者，否則，投資者將轉向債務記錄更為穩定的國家。穩定的國家政策方向可以降低風險，進而降低成本；另一方面，如果公共政策存在不確定性，則投資者需要使用「國家風險溢酬」來平衡。

因此，我們會推薦以分包策略進行專案開發，給予開發商或投資者更多優化和減少準備金比率的空間，而如果最後預留的準備金、各種風險溢酬沒被使用到，則對應而言，其專案之投資報酬率增加。請見下圖4各國家（地區）在風險溢酬和準備金比率的差異比較表。

五、結論

全球的風能累積裝置容量為達到500 GW+歷經了近半世紀，然而從現在起未來10年內，這數字有望進一步達到並超越1,000

The figure below outlines country and equity premiums as well as project specific contingencies.					
Country	Moody's sovereign rating	Country risk premium	Equity risk premium	Onshore project risk premium (unknown-unknown)	Total project contingency
United Kingdom	Aa2	0.69%	6.65%	1 to 4%	8.34 to 11.34%
United States	Aaa	0.00%	5.69%	1 to 4%	6.96 to 9.96%
Brazil	Ba2	4.17%	10.13%	2 to 6%	16.3 to 20.27%
Germany	Aaa	0.00%	5.69%	1 to 4%	6.96 to 9.96%
Western Europe	N/A	1.51%	7.47%	1 to 4%	9.98 to 12.98%
Depending on location of your project, total project contingencies can vary from -7 to 20 percent.					
Sources: Moody's, NYU Stern and K2 Management					

圖4 風險溢酬和準備金比率於各國家（地區）間之差異



GW。如此之商業規模是從前所無法想像及企及，其孕育新式商業模式、新型態夥伴關係和創新解決方案，為資產擁有者創造更好的商業機會。

隨著技術的提升，風力發電也逐步邁向傳統電力市場的競爭趨勢。在沒有化石燃料的採購風險下，對於風資源的相關分析、CFD分析風機排列下的風場，以不同的採購發包策略及運維指標，可逐步減少市場大幅擴張之下的專案不確定風險，因此對於專案之財務投資提高信心指數。

更甚者是再生能源市場已成為全球化之明星產業，各大技術、金融與能源公司均將本市場列為主要投資標的下，願意投入再生能源市場發展的臺灣公司，絕對要盡早投入，並尋找合適的夥伴與顧問，以專案風險管理心態管理投資，並獲取計畫中之技術與財務報酬。

參考文獻

1. Joel Manning. Improving project financing with CFD – a no brainer. Retrieved from <https://www.k2management.com/news/improving-project-financing-with-cfd-a-no-brainer> (2019)
2. Joel Manning. Predicting performance: sales power curves vs the real world. Retrieved from <https://www.k2management.com/news/sales-power-curves-vs-real-world> (2019)
3. Joel Manning. New generation anemometers to significantly reduce yield prediction uncertainty. Retrieved from <https://www.k2management.com/news/reducing-yield-prediction-uncertainty> (2019)
4. Time-based availability alone gives asset owners false security. Retrieved from <https://www.k2management.com/news/false-security-for-asset-owners> (2018)
5. Jesper Kranker Larsen. Project risk premiums - one size doesn't fit all. Retrieved from <https://www.k2management.com/news/project-risk-premiums> (2019)