

# IEA 22 MW 海上參考風力機之 $k-\omega$ SST 與 Realizable $k-\varepsilon$ RANS 紊流模型比較 CFD 分析

鄭世賢<sup>1\*</sup> 蘇銘泰<sup>2\*</sup> 周昭昌<sup>1</sup> 王耀明<sup>2</sup> 陳維德<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup> 國立臺灣海洋大學機械與機電工程系 碩士生

<sup>2\*</sup> 財團法人金屬工業研究發展中心 碩士

<sup>1</sup> 國立臺灣海洋大學機械與機電工程系 教授

<sup>2</sup> 財團法人金屬工業研究發展中心 博士

<sup>2</sup> 財團法人金屬工業研究發展中心 處長

## 摘要

離岸風能快速擴張，帶動超大型風力發電機的開發需求。國際能源署 (IEA) 風能技術合作計畫第 55 工作組近期發布了一款 22 MW 離岸水平軸參考風力機 (Reference Wind Turbine, RWT)，提供了統一的開源設計基準。為有效評估如此巨型風機之氣動性能，計算流體力學 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 成為關鍵工具，可較傳統葉片元素動量法 (BEM) 提供更詳細的流場資訊。然因高傳真度(fidelity)的大渦模擬 (LES) 或直接數值模擬 (DNS) 計算成本過鉅，工程上仍廣泛採用雷諾平均納維-斯托克斯 (RANS) 方法在精度與效率間取得平衡。然而，RANS 模擬精度對紊流模型的依賴甚深，特別是在預測葉片失速分離及尾流發展等複雜現象時。本研究針對 IEA 22 MW 離岸 RWT，比較兩種廣泛應用的 RANS 紊流封閉模型 —  $k-\omega$  剪應力傳輸 (shear stress transport, SST) 模型與 Realizable  $k-\varepsilon$  模型 — 在風機氣動模擬中的表現差異。透過一系列穩態 CFD 模擬，評估紊流模型對風力機整體性能 (功率、推力係數等) 預測的影響，以及對尾流結構和關鍵流動機制的捕捉能力差異，同時將結果與文獻數據比對驗證模型可靠性。研究結果將提供此新型百萬瓦級風力機之詳細氣動特性，定量評估兩模型在關鍵參數預測上的優劣，並據此提出大型風機 CFD 建模的最佳實務準則與未來研究建議。

**關鍵詞：**離岸風力發電機、計算流體力學、紊流模型、尾流、氣動性能比較

## 1. 前言與研究動機

全球能源轉型下，離岸風場不斷朝向更大規模發展。兆瓦級巨型風力機因能有效攫取強勁穩定的海上風資源，成為研發趨勢。IEA 風能計畫 Task 55 (REFWIND) 為促進研發，制定了開源的 22 MW 離岸參考風力機，使各界能基於統一的幾何與性能基準進行模擬與設計。該 RWT 轉子直徑達 284 m、額定功率 22 MW，尺寸遠超現役機組 (見表一)，其設計代表了預計 2030 年代商轉之新世代風機尺度。如此龐大風機之空氣動力學分析，需要高解析度的數值模型支援。

CFD 能提供葉片-尾流交互、失速等複雜流動的深入解析，是風機氣動設計不可或缺工具。但 CFD 模擬準確度取決於流場模型選擇，其中紊流模型至關重要。對 IEA 22 MW 風機這樣高雷諾數、強三維效應且可能涉及彈性撓曲的案例，傳統 RANS 模型的適用性面臨考驗，須經驗證方可確保預測可靠性。 $k-\omega$  SST 與 Realizable  $k-\varepsilon$  模型是工業界常用的兩種 RANS 紊流模型，各具優勢：前者結合  $k-\omega$  與  $k-\varepsilon$  模式之長處，對近壁逆壓梯度分離流具有良好預測能力；後者引入「可實現性」約束以改善標準  $k-\varepsilon$  缺陷，對旋轉再循環流動的處理更為合理。本研究之動機在於釐清這

兩模型應用於超大型風力機 CFD 分析時的異同，量化比較其在整體性能預測、尾流模擬及分離流捕捉等方面的表現差異，為後續大型風機設計與模擬提供指引。

## 2. CFD 模型與計算設定

IEA 22 MW RWT 是一款上風向、三葉片式風力發電機，具有變速和集體變槳控制功能，專為離岸部署而設計。<sup>[1]</sup> 表一總結了其主要特性。此表提供了快速、全面的概覽，對於理解 RWT 的規模和運行狀態至關重要，並構成了後續 CFD 分析的基礎。

表一：IEA 22 MW 離岸參考風力發電機主要規格

參數	數值	單位	參考資料
額定功率	22.0	MW	14
轉子直徑	284.0	m	1
輪轂高度	170.0	m	1
葉片長度	137.8	m	14
葉片數量	3	-	14
翼型系列	FFA-W3	-	14
設計葉尖速比(TSR)	9.153	-	14
最低轉子轉速	1.807	rpm	14
最高轉子轉速	7.061	rpm	14
最高葉尖速度	105.0	m/s	14
額定風速	11.0 (INO OptiFLEX 版本)	m/s	17
額定扭矩	31,465.0	kNm	14
額定推力	2,793.0	kN	14
葉片預彎	7.0	m	14
轉子預錐角	4.0	deg	14
軸傾角	6.0	deg	14
輪轂直徑	8.4	m	14

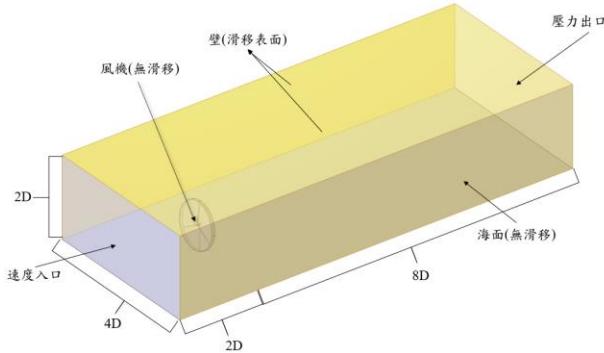
為針對 IEA 22 MW 風力機進行高擬真度的氣動分析，本研究透過模擬軟體 COMSOL Multiphysics 建立涵蓋完整轉子的三維穩態 CFD 模型。計算域採用大型圓柱域，範圍自轉子前方 2D (轉子直徑) 至後方 8D，徑向擴展 4D，以減少邊界對葉片周圍流場及尾流發展的影響。網格劃分使用葉片表面附近結構化棱柱層網格加上遠場非結構四面體/多面體網格的混合策略。葉片前緣、後緣、葉尖區域及近尾流剪切層均有網格加密，以捕捉關鍵流動梯度。

邊界條件方面，計算域入口設定為穩態風速入口（可採用均勻或對數風速剖面），出口為零壓力出口條件，遠場側邊界採對稱（滑移）壁以模擬無限大空域。轉子採用不可滑移的旋轉壁面以模擬葉片表面，相對簡化的輪轂與機艙表面則視情況給予無滑移或部分滑移條件，以兼顧計算成本與近尾流精度。旋轉參考系採用穩態多重參考座標法 (Moving Reference Frame, MRF)，透過在葉片區域加入旋轉座標系模擬轉子旋轉效應，可獲得與全瞬態方法相近的平均氣動結果，且具備較高的收斂效率。圖一彙總 CFD 模擬的計算域空間參數與邊界條件設定。

在本研究中，CFD 模擬的入口風速邊界條件參考 Cheng et al. (2020) [2] 對台灣海峽第一個商業規模離岸風場的風特性分析，特別著重 Hellmann 指數 ( $\alpha$  值) 及其與風速-高度關係的功率律公式。該研究顯示，台灣海峽風速剖面可由 Hellmann，其中  $U(z)$  為高度  $Z$  處的風速， $U_z$  為參考高度  $Z$  處的風速， $\alpha$  為 Hellmann 指數，實測值低至 0.05，反映風速隨高度增加變化極為緩慢 (90 m 與 10 m

高度間年平均風速差異小於 1 m/s），主要歸因於陸海風與季風的向量合成，導致風剖面趨近平坦並影響尾流恢復與能量產出。本模擬據此設定均勻流場，涵蓋 3-11 m/s 風速範圍，以評估風力機在實際新竹外海風場下的空氣動力性能。

$$U_Z = U_{in} \times \left( \frac{Z}{Z_{ref}} \right)^\alpha \quad (1)$$



圖一：IEA 22 MW 風力機 CFD 模擬設定摘要

### 3. 紊流模型比較

$k-\omega$  SST 模型與 Realizable  $k-\varepsilon$  模型皆為基於渦黏假設的二方程紊流模型，但其理論構架和適用範圍有所差異。前者由 F. Menter 於 1994 年提出，求解  $k$  (紊流動能) 和  $\omega$  (比耗散率) 的傳輸方程，以壁面附近  $k-\omega$  模型搭配遠場  $k-\varepsilon$  模型的混合形式克服各自缺點，特別增強了對主要紊流剪應力的預估能力。Realizable  $k-\varepsilon$  模型則由 T.-H. Shih 等人於 1995 年發展，透過引入「可實現性」數學約束以及新的渦黏度和耗散率公式，修正了標準  $k-\varepsilon$  模型在高應變率、旋轉流動下可能產生的非實體預測問題。表二 列出兩模型的核心特性比較。

表二： $k-\omega$  SST 與 Realizable  $k-\varepsilon$  紊流模型概覽

特性	$k-\omega$ SST	Realizable $k-\varepsilon$
開發者	Menter (1993, 1994)	Shih et al. (1995)
輸運變量	$k, \omega$	$k, \varepsilon$
優勢 (風力應用)	逆壓分離預測佳、近壁穩健、葉片分離準確	旋轉流、尾流擴展佳、渦流捕捉優
限制	自由流敏感、低 $Re$ 需細網格	網格敏感、壁函數限分離預測
近壁處理	解析黏性子層 ( $y^+ < 1$ )	壁函數 ( $y^+ > 30-100$ )
計算成本	相似，但穩定性依網格	相似，但穩定性依網格

總體而言， $k-\omega$  SST 模型透過在近壁區直接解析黏性次層（避免壁函數不確定性）增強了預測精度，對葉片表面流動分離等現象有較穩健的表現。Realizable  $k-\varepsilon$  模型則在保留標準  $k-\varepsilon$  模型計算效率的同時，對旋轉渦流場給予改良，可更合理地預測尾流中的湍流擴散和動量交換，常在風機等旋轉機械流場中表現出較佳的收斂速度與穩定性。然而，Realizable  $k-\varepsilon$  通常需要配合壁面函數以經驗公式橋接黏性底層，對高度三維分離流的細節捕捉可能不及 SST 模型直接解析來得精細。

下文將針對兩模型在風力機氣動性能預測、尾流結構模擬以及流動分離捕捉等方面的表現進行比較分析。

#### 4. 比較結果與討論

##### 4.1 整體功率與推力性能

風力機常用的整體氣動性能指標為功率係數  $C_P$  與推力係數  $C_T$ 。其定義如下：

$$\text{功率係數} : C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A U_\infty^3} = \frac{M\Omega}{\frac{1}{2}\rho A U_\infty^3} \quad (2)$$

$$\text{推力係數} : C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho A U_\infty^2} \quad (3)$$

式中  $P$  為風輪輸出功率， $M$  為轉子所受到之扭矩， $\Omega$  為轉子的角速度， $T$  為轉子承受之推力， $\rho$  為空氣密度， $A$  為掃風面積， $U_\infty$  為來流風速。

在本研究中，針對 IEA 22 MW 參考風力發電機進行的 CFD 模擬，以  $k-\omega$  SST 與 Realizable  $k-\epsilon$  模型計算該風力機在最佳操作範圍內（風速 3-11 m/s）的多個關鍵條件（啟動風速到額定風速）下的  $C_P$  與  $C_T$ ，並比較差異（示意見表三），本研究的模擬結果顯示，雖然兩種紊流模型在最佳效率點附近預測的性能指標差異有限，但在接近額定功率的高風速區間，兩者趨勢開始分歧。具體而言，Realizable  $k-\epsilon$  模型預測的功率係數 ( $C_P$ ) 略高於  $k-\omega$  SST 模型，且兩者在推力係數 ( $C_T$ ) 的預測上也因對流場分離的處理不同而產生偏離。此趨勢與針對 NREL 5 MW 風機的既有文獻 [6] 結論相符，該研究同樣指出 Realizable  $k-\epsilon$  模型傾向於高估輸出扭矩，並在葉片吸力面預測出較強的負壓峰值。

整體而言，在最佳操作範圍內兩模型對  $C_P$ 、 $C_T$  的預測趨勢相符，而 SST 模型表現出較佳的可靠性，然而模擬結果顯示  $C_P$  與  $C_T$  值均顯著偏低，此現象主要歸因於網格解析度不足，模擬中採用的網格總單元數約 1700 萬，雖然已在葉片表面進行細化，但  $y^+$  值尚未達到要求 ( $k-\omega$  SST 為  $<1$ ，Realizable  $k-\epsilon$  為 30~100)，導致分離流及渦黏度預測偏差，進而低估空氣動力性能，類似結論見於 Al-Ttowi et al. (2024) 的 NREL Phase VI 風力機 CFD 調查，該研究指出  $k-\epsilon$  模型雖在高風速下與實驗數據最接近，但  $k-\omega$  SST 模型僅在風速達 10 m/s 以上時始能有效捕捉流場分離與剪應力傳輸現象，皆強調網格品質是限制 RANS 模型預測大型風力機性能的關鍵因素。因此，未來研究的首要步驟應是執行網格獨立性測試，透過系統性加密葉片邊界層與尾流區域，預期能顯著提升氣動力預測的準確性。

表三：不同關鍵風況下兩種紊流模型預測之功率( $C_P$ )/推力( $C_T$ )係數比較

參數	操作條件 $U_\infty (m/s)$	$k-\omega$ SST	Realizable $k-\epsilon$
$C_P$	3	0.33%	7.40%
	5	0.23%	7.48%
	7	0.35%	7.53%
	9	0.38%	7.57%
	11	0.38%	7.61%
$C_T$	3	47.33%	5.33%
	5	47.18%	5.33%
	7	47.47%	5.33%
	9	47.48%	5.33%
	11	47.51%	5.33%

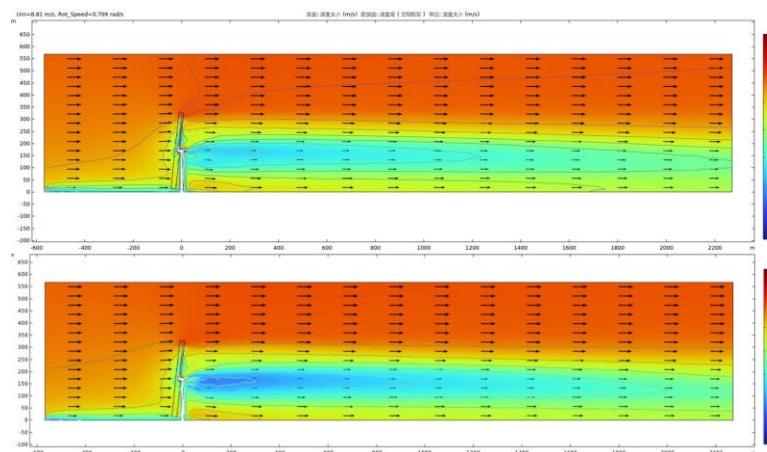
## 4.2 尾流結構與發展

大型風力機尾流的擴散與恢復直接影響後排機組性能與載荷。尾流可分為近尾流區（轉子後方，受葉尖渦、根部渦及葉片負荷影響）和遠尾流區（流場擴散、自相似化）。RANS 模型透過渦黏度預測尾流動量混合，若剪切層渦黏性較高，則尾流恢復較快。本研究比較兩模型的尾流場，包括下游 1D、3D、5D、7D 處的速度虧損（如表四）。結果顯示，Realizable  $k-\varepsilon$  模型預測尾流恢復迅速，虧損 0.65% - 0.69%，變化微小； $k-\omega$  SST 模型則剩餘速度較低，自 1D 處 7.28% - 7.34% 漸恢復至 7D 處 6.46% - 6.50%，恢復較緩。以 11 m/s 額定風速 5D 處為例，Realizable  $k-\varepsilon$  虧損 0.66%，遠低於  $k-\omega$  SST 的 7.01%。

表四：下游不同距離處尾流速度虧損比較

模型	操作條件 $U_\infty$ (m/s)	D	3D	5D	7D
$k-\omega$ SST	3	7.28%	7.50%	6.96%	6.46%
	5	7.31%	7.53%	6.98%	6.48%
	7	7.32%	7.55%	7.00%	6.49%
	9	7.33%	7.55%	7.00%	6.49%
	11	7.34%	7.56%	7.01%	6.50%
Realizable $k-\varepsilon$	3	0.69%	0.69%	0.67%	0.66%
	5	0.68%	0.69%	0.66%	0.65%
	7	0.68%	0.69%	0.66%	0.65%
	9	0.68%	0.69%	0.66%	0.65%
	11	0.69%	0.69%	0.66%	0.65%

圖二呈現 11 m/s 自由流下兩模型尾流速度場，顏色從藍（低速）到紅（高速），箭頭示流向。Realizable  $k-\varepsilon$ （上圖）尾流恢復快，低速區限於轉子後方，迅速過渡高速區，反映其對旋轉流與渦擴散優化； $k-\omega$  SST（下圖）尾流延伸顯著，低速區軸向擴展較遠，恢復緩慢。



圖二：風速尾流衰減圖，Realizable  $k-\varepsilon$  (上圖)、 $k-\omega$  SST (下圖)

上述差異主要與各紊流模型對湍流動能（Turbulent Kinetic Energy, TKE）之產生與耗散機制的處理方式相關。 $k-\omega$  SST 模型對逆壓力梯度與流動分離具有較高敏感度，因而能在尾流近場（包含渦核區與尾流膨脹區）提供較穩健的預測結果。相對地，Realizable  $k-\varepsilon$  模型經過針對旋轉與再循環流的修正，使其在尾流渦旋破碎與混合過程中表現較佳。因此，預期 Realizable  $k-\varepsilon$  模型會呈現尾流較快速的擴散與對稱性恢復趨勢。此外，根據 COMSOL 官方技術文件，近壁面處理方式會受

到無因次壁面距離 ( $y^+$ ) 的影響。當  $y^+ < 1$  時， $k-\omega$  SST 模型會自動切換至  $k-\varepsilon$  模式，並採用壁函數進行近壁層計算；而 Realizable  $k-\varepsilon$  模型則引入旋流修正項（Swirl Correction），因此在描述旋轉流動與流動分離方面具備更佳的適用性。

## 5. 結論與建議

本研究針對 IEA 22 MW 離岸參考風力機，深入比較了  $k-\omega$  SST 與 Realizable  $k-\varepsilon$  兩種常用 RANS 紊流模型在 CFD 氣動分析中的表現差異。研究結論如下：

### 1. 總體性能預測：

- $k-\omega$  SST 模型在氣動性能預測上與參考數據 [8] 的一致性更佳，傾向於提早預測流場分離，提供較為保守（貼近實際）的功率與推力估計，展現出更高的穩健性，建議作為大型風機氣動分析的基準模型。
- Realizable  $k-\varepsilon$  模型則傾向延後預測失速，可能導致扭矩與功率的高估。然而，其在捕捉旋轉效應與較快的尾流混合方面具有參考價值。

### 2. 特定物理現象分析：

- 尾流模擬：Realizable  $k-\varepsilon$  預測的尾流擴散較快，有助於評估風場中機組干擾的上限；SST 模型預測的尾流恢復較慢，可為風場佈局提供保守的設計參考。
- 失速預測：SST 模型在葉片大攻角的深度失速區域預測更為可靠，而 Realizable  $k-\varepsilon$  模型則在捕捉葉尖由旋轉引發的失速延遲現象上更具優勢。

綜上所述，為提升未來百米級以上大型風機葉片模擬的預測信度，建議採取整合性的精進策略：首先，必須採用更精細的近壁網格解析（確保  $y^+ < 1$ ），以準確捕捉邊界層發展與流場分離現象；其次，針對葉尖區域因高速旋轉引發的可壓縮性效應，應考慮引入修正模型或採用如 DES、LES 等更高傳真度的模擬方法，以精確解析複雜的尾流渦結構；最後，應建立系統性的不確定性量化流程，透過在關鍵條件下交叉比對不同紊流模型並與實驗數據進行驗證，以確保模擬結果的工程應用價值。

## 6. 參考文獻

- [1] F. R. Menter, “Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications,” *AIAA Journal*, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605, 1994.
- [2] T. H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, and J. Zhu, “A new  $k-\varepsilon$  eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows,” *NASA Technical Memorandum 106721*, 1995.
- [3] C. E. Carcangiu, CFD-RANS study of horizontal axis wind turbines, Ph.D. dissertation, University of Cagliari, Italy, 2015.
- [4] K.-S. Cheng, C.-Y. Ho, and J.-H. Teng, “Wind characteristics in the Taiwan Strait: A case study of the first offshore wind farm in Taiwan,” *Energies*, vol. 13, no. 24, p. 6492, 2020.
- [5] ANSYS Inc., “Best practice: RANS turbulence modeling in Ansys CFD,” Technical Report, 2021, [Online]. Available: internal documentation.
- [6] A. Al-Ttowi, A. N. Mohammed, S. Al-Alimi, W. Zhou, Y. Saif, and I. F. Ismail, “Computational fluid dynamics (CFD) investigation of NREL Phase VI wind turbine performance using various turbulence models,” *Processes*, vol. 12, no. 1994, 2024.
- [7] IEA Wind TCP Task 55, Definition of the IEA 22-Megawatt Offshore Reference Wind Turbine, Technical Report, 2024. [Online]. Available: <https://iea-wind.org/wp-content/uploads/2024/04/iea-22-280-rwt-report.pdf>.
- [8] W. Collier et al., “Aeroelastic code comparison using the IEA 22MW reference turbine,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2767, 052042, 2024.