

應用風洞試驗探討以縮尺模擬IEC規範中常見設計風況之可行性

羅元隆^{1*} 陳立綱² 傅仲麟³ 吳杰勳⁴

摘 要

本研究首先以國際電工委員會(International Electronic Committee, IEC)所公布的風力機設計規範IEC 61400-1或IEC 61400-3-1中，針對數種不同設計載重組合中的設計風況內容予以定義上的說明。接著採用四種不同的方式，分別為風洞實驗、由美國再生能源實驗室(NREL)所開發的FAST程式的TurbSim模組(FAST V8版)、由丹麥科技大學(DTU)所開發的HAWC2軟體、基於MDSRFG的模擬風場等四種，重現設計風況的風場歷時，針對代表風場特性的平均風速剖面、紊流強度剖面、紊流積分尺度剖面、擾動風速頻譜、以及擾動風速交頻譜等，進行與IEC規範的差異性比對。本研究結果顯示，FAST的FAST V8版TurbSim模組及DTU開發的HAWC2有其不足之處或受限於規範風況的定義，相較於此，基於MDSRFG的紊流產生模式則可以藉由調整風場參數來模擬各種流場。最後，本研究所採用的複數風扇風洞則能針對多數地穩態風場及部分的非正常氣流進行物理模擬並提供給縮尺模型進行氣動力量測試驗，可作為一種進階的驗證工具。

關鍵詞：IEC，風洞試驗，TurbSim，HAWC2，MDSRFG

1. 前 言

由於全球人口日亦漸增以及3C技術的快速發展，世界各國對於能源使用的需求急速增加。並且，隨著環保意識抬頭與化石類能源的過度使用，造成了區域氣候極端化，災害種類不僅變化多端，且影響範圍迅速擴大。我國政府自2000年起，逐一檢視過往我國能源政策的方向，並開始致力於發展再生能源，以期用以取代化石類能源。其中風力發電，不管是陸域或者離岸，更是視為其中最重要的一環。近年

來，隨著陸域風力發電的發展日漸飽和，且我國西部沿岸的風場充沛且海床深度不大的面積較廣，海上風場相較於陸域風場更具有良好的風場潛力。然而，我國海氣象環境條件遠較歐洲各國來得更為險峻，每年頻繁侵臺的颱風以及多變的颱風路徑，加上數十年可能發生一次的強烈地震，大大地提高了我國離岸風力發電發展的設計門檻。故此，深入瞭解本土風況特性並將之重現於結構分析的技術對於風力機設計安全十分關鍵。本研究擬以IEC規範的各種風況為對象，採用四種方法模擬風場歷時進行

¹國立臺北科技大學土木工程系 副教授

²國立臺北科技大學土木工程系土木與防災研究所 研究生

³淡江大學風工程研究中心 研究員

⁴淡江大學土木工程學系 助理教授

*通訊作者，電話：02-2771-2171#2680，電郵：yllo@mail.ntut.edu.tw

收到日期: 2022年10月13日

修正日期: 2022年12月29日

接受日期: 2023年01月10日

直觀質性的比較，探討風況模擬的差異性對於風力機設計安全的可能影響。由於國內外多數傳統的風洞實驗室僅能模擬一般中性大氣邊界層，因此本研究希望採用國內首座主動控制式複數風扇風洞，嘗試模擬IEC規範中的部分風況，提供給國內各界作為未來驗證工具的參考。

2. IEC規範風況定義

在設計風力機時，須先針對目標風場所需的風機性能進行設定。國際電工規範IEC 61400-1 (IEC, 2019a)、IEC 61400-3-1 (IEC, 2019b)提供了選用風力機等級的基本參數表，如表1所示。此表中提供了三種標準風力機等級，主要依照可承受之風速定義了三種不同等級的輪轂高度平均風速(V_{ave})及參考風速(V_{ref})。輪轂高度平均風速有7.5 m/s、8.5 m/s、10 m/s三種等級。而相對應的參考風速，也可視為極端風速，則定義為37.5 m/s、42.5 m/s、及50 m/

s三種等級。此外，針對熱帶及副熱帶容易發生熱帶低氣壓氣流或颱風區域，國際電工規範增加了參考風速57 m/s的等級。此外，每種等級又可針對適合不同紊流特性分為A+、A、B、C四種類別。除了可承受風速外，風機性能尚須定義出正常操作情形下之啟動風速(Cut-in wind speed)、額定風速(Rate wind speed)、停止風速(Cut-out wind speed)。後續模擬各種風況時，會用到上述風速條件。以下將針對各種常見的風況目標內容進行說明。

(一) 正常風剖面模型Normal Wind Profile Model (NWP)

第一種設計風況稱為正常風剖面模型(Normal Wind Profile Model)，簡稱NWP。其風速剖面以指數律表示，指數為0.2。風速剖面如後式定義：

$$V(z) = V_{hub} (z/z_{hub})^{\alpha} \quad (1)$$

其中 z 為高度， V_{hub} 與 z_{hub} 分別代表輪轂處的平均

表1 風機等級基本參數表(擷取自IEC 61400-1)

Wind turbine class		I	II	III	S
V _{ave}	(m/s)	10	8.5	7.5	Specified by the designer
V _{ref}	(m/s)	50	42.5	37.5	
	Tropical V _{ref, T} (m/s)	57			
I _{ref}	A+	0.18			
	A	0.16			
	B	0.14			
	C	0.12			
The parameters apply to the hub height and V _{ave} : Annual average wind speed V _{ref} : Reference wind speed averaged over 10 minutes V _{ref, T} : Reference wind speed averaged over 10 minutes applicable to areas subject to tropical cyclones A+ : Designates the category for very high turbulence characteristics A : Designates the category for higher turbulence characteristics B : Designates the category for medium turbulence characteristics C : Designates the category for lower turbulence characteristics I _{ref} : A reference value of the turbulence intensity (See IEC 61400-1 6.3.2.3)					

風速與高度。此風況並未描述擾動風速，因此擾動風速設定為零，代表瞬間風速為一定值，亦即風速不會隨時間變化。以真實性來說，這是不存在的風場。然而根據IEC規範，此風況搭配其他載重作為某一設計載重組合用以檢驗風力機的設計。

此風況條件屬於風機正常操作條件下之風速。風速範圍應介於啟動風速3 m/s至25 m/s之間。進行風力機設計分析時，通常會在此風速範圍內，從啟動風速開始，逐次增加2 m/s進行一次分析，直到25 m/s為止。然而，本研究主要是嘗試以風洞試驗方式模擬風場並與軟體模擬進行比對。因此，進行風洞試驗模擬時，直接以風速範圍內之最高風速25 m/s作為模擬目標。此外，雖然擾動風速之設定為無，但在風洞模擬時僅能盡量降低擾動風速，並無法達到真正無擾動的效果。一般在大氣紊流邊界層範圍內，本就不可能有無擾動風速的情形發生。

(二) 正常擾流模型 Normal Turbulence Model (NTM)

第二種設計風況稱為正常擾流模型(Normal Turbulence Model)，簡稱NTM。此風況所定義的擾動標準差代表值 σ_1 由以輪轂高度的擾動風速標準差之90%分位數(Quantile)求得，但僅有縱向(順風向)擾動標準差。公式如後：

$$\sigma_1 = I_{ref}(0.75V_{hub} + b) ; b = 5.6 \text{ m/s} \quad (2)$$

其中 σ_1 代表縱向擾動風速， I_{ref} 代表表1所提供的風機分級表中的紊流特性。根據IEC 61400-1，式(2)可改由韋伯分布表示如後式：

$$P_w(\sigma_1 < \sigma_0) = 1 - \exp[-(\frac{\sigma_0}{C})^k] \quad (3)$$

$$k = 0.27V_{hub} + 1.4 \quad (4)$$

$$C = I_{ref}(0.75V_{hub} + 3.3) \quad (5)$$

其中 P_w 代表韋伯分布的非超越機率分布。式(2)即為將式(3)中的 $P_w(\sigma_1 < \sigma_0)$ 設定為90%時，採用表1中的 I_{ref} 和 V_{hub} 所對應的 σ_1 結果。

本研究採用 $I_{ref} = 0.12$ 作為模擬對象。此風況條件並未定義風速剖面，因此流場的平均風速並未隨高度變化。但因為有設定紊流條件，因此瞬間風速會隨時間而變化。該風況條件亦為風機正常操作條件下之風況，因此輪轂高度的平均風速 V_{hub} 設定為25 m/s進行模擬。

(三) 極端風速模型 Extreme Wind Speed Model (EWM)

第三種設計風況稱為極端風速模型(Extreme Wind Speed Model)，簡稱EWM。此模型分為穩態(Steady)及紊流(Turbulent)兩種型態，主要都是在模擬颱風事件等極端風速產生時的風況。EWM穩態模型在輪轂處的極端風速為定值，假設為50年回歸期極端風速 V_{ref} 的1.4倍，並且以指數為0.11的平均風速剖面考慮高度上的變化。當考慮為1年回歸期時，其風速則假設為50年回歸期風速的0.8倍。其式如後：

$$V_{es0}(z) = 1.4V_{ref}(z/z_{hub})^{0.11} \quad (6)$$

$$V_{e1}(z) = 0.8V_{es0}(z) \quad (7)$$

此風況主要在模擬極端風速產生的情形，故 V_{ref} 採用表1中屬於熱帶地區的參考風速57 m/s。式(6)及式(7)定義極端風速事件期間的陣風風速，並無擾動風速，分析時視同靜力分析。

EWM紊流模型同樣假設輪轂處50年回歸期極端風速等於 $V_{ref, T}$ ，其風速剖面亦為指數0.11。1年回歸期風速為50年回歸期風速的0.8倍。此外，定義擾動風速為輪轂高度風速的11%。換言之，EWM紊流模型假設的風場具有時間變化。其定義如式(8)、(9)、(10)所示。

$$V_{50}(z) = V_{ref}(z/z_{hub})^{0.11} \quad (8)$$

$$V_1(z) = 0.8V_{50}(z) \quad (9)$$

$$\sigma_1 = 0.11V_{hub} \quad (10)$$

(四) 極端操作陣風 Extreme Operating Gust (EOG)

極端操作陣風模型(Extreme Operating Gust)，簡稱EOG。主要在描述風速在短時間內上升又下降的特性。在風機正常操作狀態下，提供一段10.5秒長度的特定陣風型態進行檢核，假設風力機輪轂高度預期50年回歸期的最大陣風風速 V_{gust} 為後式所述：

$$V_{gust} = \text{Min} \left\{ 1.35(V_{e1} - V_{hub}); 3.3 \left(\frac{\sigma_1}{1 + 0.1(\frac{D}{\Lambda_1})} \right) \right\} \quad (11)$$

其中 σ_1 為式(2)所定義。 D 為葉輪直徑。 Λ_1 為順風向高度 z 處的紊流尺度參數，可由式(12)決定。 V_{e1} 由式(7)決定，代表1年回歸期極端風速。

$$\Lambda_1 = \begin{cases} 0.7z, & z \leq 60 \text{ m} \\ 42 \text{ m}, & z \geq 60 \text{ m} \end{cases} \quad (12)$$

根據式(11)、(12)，EOG風場可以假設為式(13)，其中 $V(z)$ 由式(1)決定， T 為10.5秒。

$$V(z, t) = \begin{cases} (V(z) - 0.37V_{gust} \sin(3\pi t/T)(1 - \cos(2\pi t/T))) & \text{for } 0 \leq t \leq T \\ V(z) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

(五) 極端紊流模型 Extreme Turbulence Model (ETM)

極端紊流模型(Extreme Turbulence Model)，簡稱ETM。此設計風況採用NWP平均風速剖面，但不同於NTM，另外假設順風向擾動風速。採用後式計算：

$$\sigma_1 = c I_{ref} (0.072(\frac{V_{ave}}{c} + 3)(\frac{V_{hub}}{c} - 4) + 10); c = 2 \text{ m/s} \quad (14)$$

其中 V_{ave} 為表1風機等級表中選定的平均

風速，本研究設定為等級I的風機，平均風速 V_{ave} 為10 m/s。 I_{ref} 同樣假設為0.12。 V_{hub} 則選擇正常操作範圍的停止風速25 m/s。

(六) 極端風切模型 Extreme Wind Shear (EWS)

極端風切模型(Extreme Wind Shear)，簡稱EWS。此風況是模擬風速剖面在短時間(12秒)內，垂直向及水平向之風速剖面產生瞬間變化的特性。瞬間垂直向風切變化可以分為正向與負向兩種，如式(15)所示：

$$V(z, t) = \begin{cases} V_{hub} \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^{\alpha} \pm \left(\frac{z - z_{hub}}{D} \right) (2.5 + 0.2\beta\sigma_1 \left(\frac{D}{\Lambda_1} \right)^{1/4}) (1 - \cos(2\pi t/T)) & \text{for } 0 \leq t \leq T \\ V_{hub} \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^{\alpha} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

瞬間水平風切變化如式(16)所示：

$$V(y, z, t) = \begin{cases} V_{hub} \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^{\alpha} \pm \left(\frac{y}{D} \right) (2.5 + 0.2\beta\sigma_1 \left(\frac{D}{\Lambda_1} \right)^{1/4}) (1 - \cos(2\pi t/T)) & \text{for } 0 \leq t \leq T \\ V_{hub} \left(\frac{z}{z_{hub}} \right)^{\alpha} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

式(15)及(16)中， Λ_1 以式(12)計算， σ_1 以式(2)計算， D 為葉輪直徑。 V_{hub} 設定為正常操作範圍的停止風速25 m/s。 α 為0.2， β 為6.4， T 為12秒。

在IEC規範中的風況尚有極端風向變化(Extreme Direction Change, EDC)以及風向變化之極端相干陣風(Extreme Coherent Gust with Direction Change)兩種設計風況。然而，礙於本研究所採用的風洞機具性能限制，目前尚無法有效以物理模擬方式產生此兩種風況。另外，極端風切模型(EWS)中的瞬間水平風切變化也因風洞性能限制無法模擬比較。

3. 風場模擬方法與理論

(一) 複數風扇風洞簡介

複數風扇風洞為淡江大學風工程研究中心第四座風洞機具。此風洞與傳統大氣紊流邊

界層風洞不一樣的是，複數風扇風洞為主要控制、吹出式開放風洞。取名「複數」主要是本風洞共具有縱向12顆伺服馬達及風扇單元、橫向6顆伺服馬達及風扇單元，共計72顆可以控制吹出、吸入的風扇陣列組合，亦可以稱為陣列式複數風洞。圖1為複數風洞示意圖以及各部分的實際照片。單一風扇與馬達的斷面尺寸為 $220 \times 220 \text{ mm}^2$ ；動力段縱向高度為2,640 mm、橫向寬度為1,320 mm。收縮段為2:1比例的縱向收縮，因此試驗斷面尺寸為 $1,320 \times 1,320 \text{ mm}^2$ 。收縮段內，每一個風扇均具備獨立渠道不受彼此影響，獨立氣流進入試驗段後方始混合。試驗段長度560 mm，具備三個腔體，在最下游的腔體中則附設圓盤系統，作為建築模型架設進行實驗之用。三個腔體的天花板均設有軌道可使天車系統走動並向下延伸出風速量測支架。

複數風扇風洞的每一伺服馬達均可以在0.5

秒內由2,000 RPM上升至4,000 RPM，換算成加速度大約是 8 m/sec^2 左右，適合用來模擬加速上升氣流所造成的非定常性氣流。此外，馬達最高轉速為6,000 RPM，大約可以在風洞內產生 17 m/sec 左右的風速。雖然風速不高，但仍然屬於一般建築風洞可以適用的範圍。此種風洞尚具備其他優點：(1)風速剖面由72顆可獨立控制的馬達透過時變性的轉速來模擬，因此可以滿足本研究計畫中具備時變性風速剖面的需求；(2)順風向紊流強度由馬達本身所控制，因此可以產生均勻平滑流流場、均勻紊流流場、剪力流流場、大尺度渦流流場以及一般的大氣紊流邊界層流場；(3)由於主動控制，因此不需要太長的發展段。然而，相較於傳統吸入式風洞，此類風洞需要較佳的收縮段、蜂巢網、濾網層設計，以便形成良好的流場品質。相對的，一般的吸入式風洞若具備足夠的發展段，則可以發

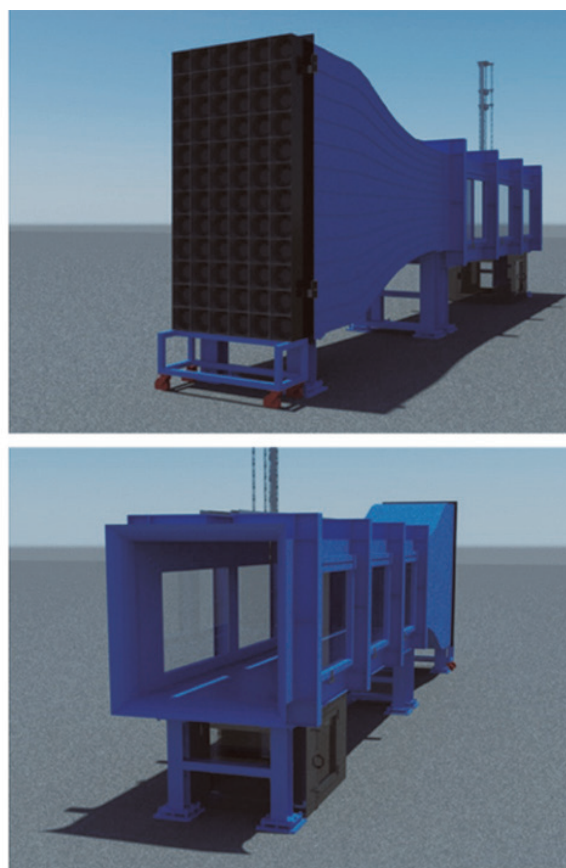
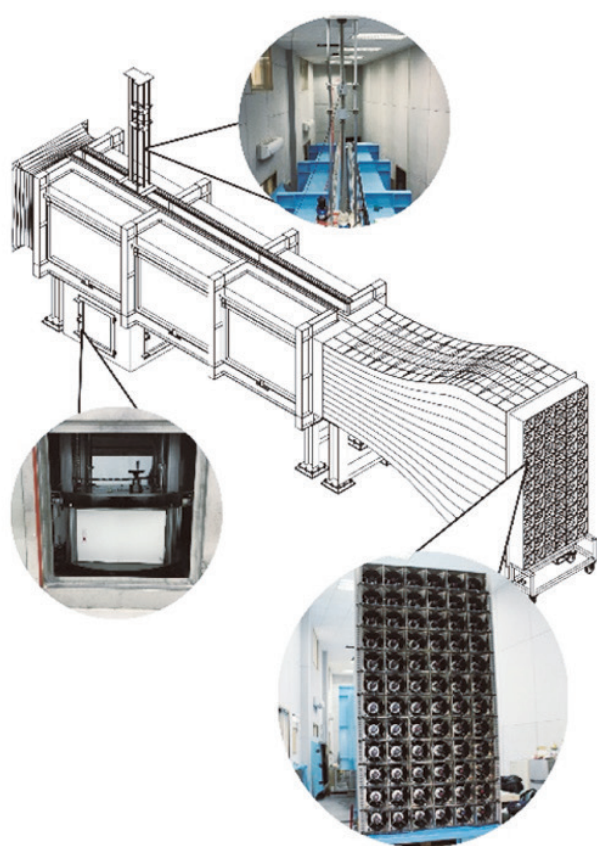


圖1 複數風扇風洞示意圖及部分機構照片

展出十分完善的理想平滑流流場。

(二) FAST V8版TurbSim模組

FAST V8版模擬軟體由美國再生能源實驗室NREL (National Renewable Energy Laboratory)的Dr. Jonkman等人(Jonkman *et al.*, 2009)所開發，其中取名FAST即為針對風力機的各種分析模組，包含疲勞(Fatigue)、氣動力(Aerodynamics)、結構(Structures)、紊流(Turbulence)等，是一套用於計算風力機動態載重的程式，並持續由NREL更新及支援。此軟體主要是用Fortran語法所撰寫，其中風力機動態載重計算分析的流程如圖2所示。軟體內建26個範例提供使用參考。檔案類型可分為陸域風力機與離岸風力機，不同風力機機型皆可進行結構動力、空氣動力、流體動力等相關參數設定。藉由執行檔分析出不同負載(風力、海浪與海流等)作用下，風力機塔架(Tower)底部的位移與內力反應資料。

本研究使用命令提示字元，執行FAST_x64.exe加上指定風力機類型條件所需的檔案

test19.fst (NREL 5MW風力機開放範例)來進行。其中模擬風力機所受之風場是由TurbSim模組輸出，初始條件設定包含風譜模型、IEC的風況標準、分析時間步長、總輸出時間長度及如何計算平均流場等。TurbSim模組定義風速是以風力機輪轂Hub高度的位置作為基準，輸出檔主要包含U、V、W向的歷時檔及相關統計資料，作為後續風力機載重計算的依據。

(三) HAWC2分析軟體

HAWC2分析軟體主要是在2003-2007年間由丹麥DTU Wind Energy為風力機設計和驗證目的而開發的氣動彈性特性之研究成果(Natarajan *et al.*, 2016)。其程式如同OpenFAST一般以Blade Element Momentum (BEM)理論為基礎，利用命令提示字元進行，透過設定輪鼓高度處風速、平均風速剖面指數 α 值等風場參數，一次產生U、V、W向的風場歷時檔，輸入後進而計算設計風力機之結構反應。其架構與FAST類似，因此納入作為風場比較的來源之一。

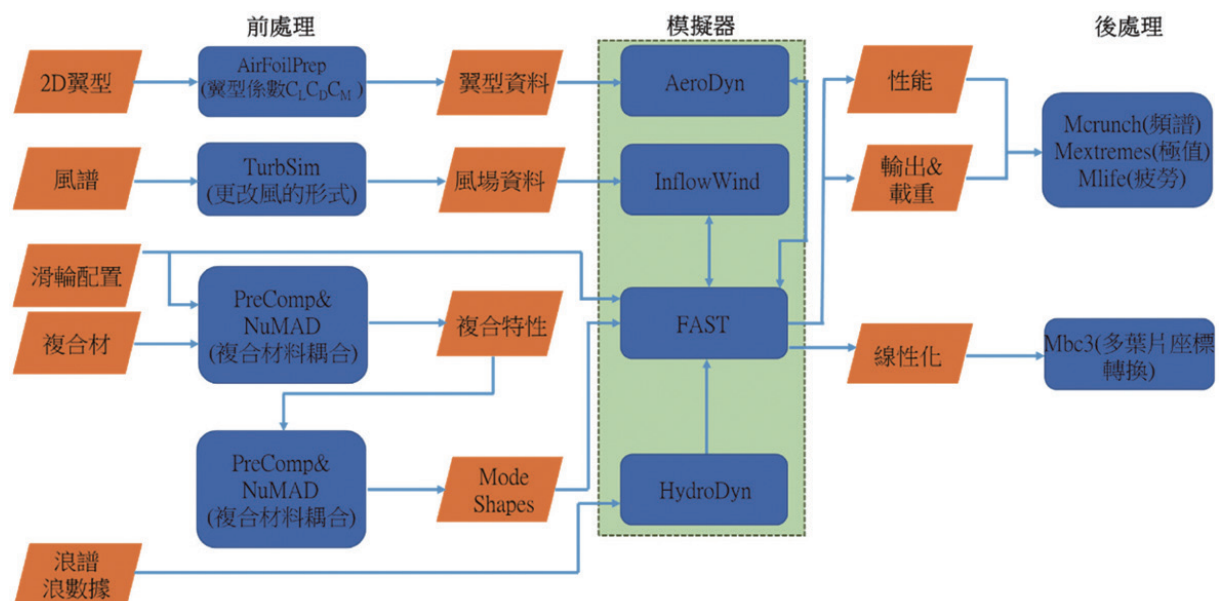


圖2 FAST分析模組示意圖

(四) MDSRFG基本原理

紊流邊界層之入流邊界模擬為計算風工程領域之重要課題，Huang *et al.* (2010)提出先進的離散同步隨機紊流產生法(Discretizing and synthesizing random flow generation, DSRFG)，建構適用於大渦模擬(Large-Eddy-Simulation, LES)之入流紊流產生器，可輸入任意風速頻譜，並且滿足非等向性與空間相關性。Castro *et al.* (2011)基於DSRFG方法進行修正研究，除維持原有特性與優點外，另提升空間相關因子的可調式性，並加入時間相關性因子，得到改良式隨機紊流產生法(Modified discretizing and synthesizing random flow generation, MDSRFG)，使得該紊流產生器的調適度更加提升。本研究風場產生的其中一種方法基於MDSRFG方法以MATLAB程式語言撰寫產生，參數設定條件包含平均風速、紊流強度以及紊流積分長度尺度，再套入von Kármán之非等向性紊流頻譜，產生出符合紊流場資料，完成紊流流場(Li *et al.*, 2015)。風速隨著空間與時間變化，型式為傅利葉級數(Fourier series)的合成，其表示式如下：

$$U(x, t) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [p_i^{m,n} \cos(\tilde{k}_j^{m,n} \tilde{x}_j + \omega_{m,n} t/\tau_0) + q_i^{m,n} \sin(\tilde{k}_j^{m,n} \tilde{x}_j + \omega_{m,n} t/\tau_0)] \quad (17)$$

$$p_i^{m,n} = \text{sign}(r_i^{m,n}) \sqrt{\frac{4c_i}{N} E_i(k_m) \Delta k_m \frac{(r_i^{m,n})^2}{1 + (r_i^{m,n})^2}} \quad (18)$$

$$p_i^{m,n} = \text{sign}(r_i^{m,n}) \sqrt{\frac{4c_i}{N} E_i(k_m) \Delta k_m \frac{(r_i^{m,n})^2}{1 + (r_i^{m,n})^2}} \quad (19)$$

其中 $\omega_{m,n} \in N(0, 2\pi f_m)$ 表示為 $\mu_\omega = 0$ 及 $\sigma_\omega = 2\pi f_m$ 的常態分布隨機數據。 f_m 相對應於波數 m 之頻率。 $r_i^{m,n}$ 為 $\mu_r = 0$ 及 $\sigma_r = 0$ 的三維空間常態分佈隨機數據。 $c_i = 0.5\bar{U}$ ， \bar{U} 為平均風速。 $\tilde{x} = x/L_s$ ，其中 $L_s = \theta_1 \sqrt{L_u^2 + L_v^2 + L_w^2}$ 為空間相關性調整因子， L_u 、

L_v 、 L_w 是順風向、橫風向、垂直性的紊流積分尺度， θ_1 為自選定的調整因子， x 則為空間位置。 $\tau_0 = \theta_2 L_s / \bar{U}$ 為時間相依因子， θ_2 為自選定的調整因子。 $\tilde{k}^{m,n} = k^{m,n}/k_0$ 表示三維空間非恆定性非等向性紊流。 Δk_m 為頻率解析度大小。 $E(k_m)$ 為目標頻譜。因考慮大氣邊界層以及風洞實驗所呈現之紊流頻譜特性，故在頻譜部分採用von Kármán所建議的非等向性紊流頻譜模型如後：

$$S_u(f) = \frac{4(I_u \bar{U})^2 (L_u / \bar{U})}{[1 + 70.8(f L_u / \bar{U})^2]^{5/6}} \quad (20)$$

$$S_v(f) = \frac{4(I_v \bar{U})^2 (L_v / \bar{U}) [1 + 188.4(2f L_v / \bar{U})^2]}{[1 + 70.8(2f L_v / \bar{U})^2]^{11/6}} \quad (21)$$

$$S_w(f) = \frac{4(I_w \bar{U})^2 (L_w / \bar{U}) [1 + 188.4(2f L_w / \bar{U})^2]}{[1 + 70.8(2f L_w / \bar{U})^2]^{11/6}} \quad (22)$$

其中 I_u 、 I_v 、 I_w 分別為順風向、橫風向、垂直向速度之紊流強度， L_u 、 L_v 、 L_w 則分別為順風向、橫風向、垂直向速度在 x 方向的紊流積分長度尺度。

4. 風況模擬結果比較

在第二段中所提及之NWP風況實際上僅為描述平均風速剖面形狀的一種風況定義，並無包含紊流等特性。因此一般來說NWP風況的定義多半被包含在其他風況中。對於嘗試以各種模擬方法來重現風況的本研究來說，NWP風況的模擬比較可以忽略。

(一) ETM風況之比較結果

首先採用上述所提的四種方法進行模擬ETM風況的風速特性與IEC規範所定義之風速特性進行比較。其中因為風洞試驗是採1/150長度縮尺方式進行物理模擬試驗，因此，在比較時須先將風洞試驗高度轉換為實場高度，再

與IEC規範風況進行比較。此外，風速縮尺是採1/2.5進行風速模擬，因此亦須將轉換至實場風速再進行比較。其他MDSRFG、TurbSim、HAWC2三者則無所謂縮尺轉換的問題。由圖3中的平均風速剖面看來，風洞試驗的物理模擬風速(圖中以WT表示)、基於MDSRFG理論的數值模擬風速(圖中以MDSRFG表示)、FAST中TurbSim模組的數值模擬風速(圖中以TurbSim

表示)、以及HAWC2的數值模擬風速(圖中以HAWC2表示)，皆能與IEC規範中定義公式之目標平均風速剖面在整體剖面形狀上十分接近。

在比較紊流強度的部分，各分量的紊流強度剖面圖可如圖4所示。其中順風向(縱向或本文中的u向)紊流強度方面，風洞模擬結果約介於12%~25%間，與IEC規範要求的頗為相近。橫風向(或本文中的v向)紊流強度方面，風洞模擬結果約介於10%~20%間，略高於IEC規範要求的8%~15%間。在垂直向(或本文中的w向)紊流強度方面，風洞模擬結果約介於10%~12%間，高於IEC規範所要求的6%~10%間。而MDSRFG、TurbSim及HAWC2軟體模擬皆可與IEC規範相似。

紊流積分尺度代表大氣紊流場中的平均渦流(Eddy)大小。自然界大氣紊流邊界層中的紊流積分尺度，可依地況條件不同，從數十公尺到數百公尺不等。紊流積分尺度剖面圖如圖5所示，IEC規範中所定義的順風向紊流積分尺度在輪轂處約為340公尺。風洞模擬中的紊流積分尺度則受限於風洞與格柵的尺寸，換算至實場，約為60公尺至120公尺左右，遠較模擬目標

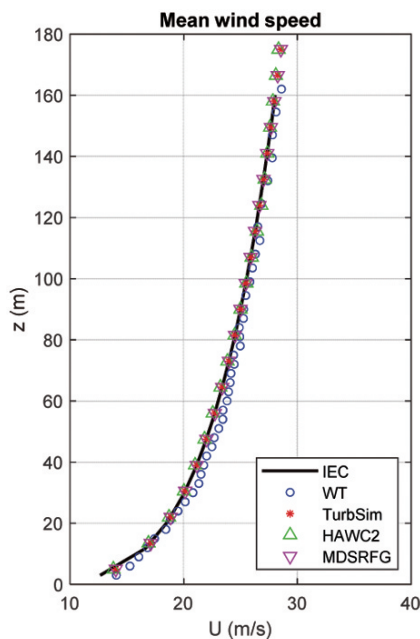


圖3 比較ETM風況之平均風速剖面

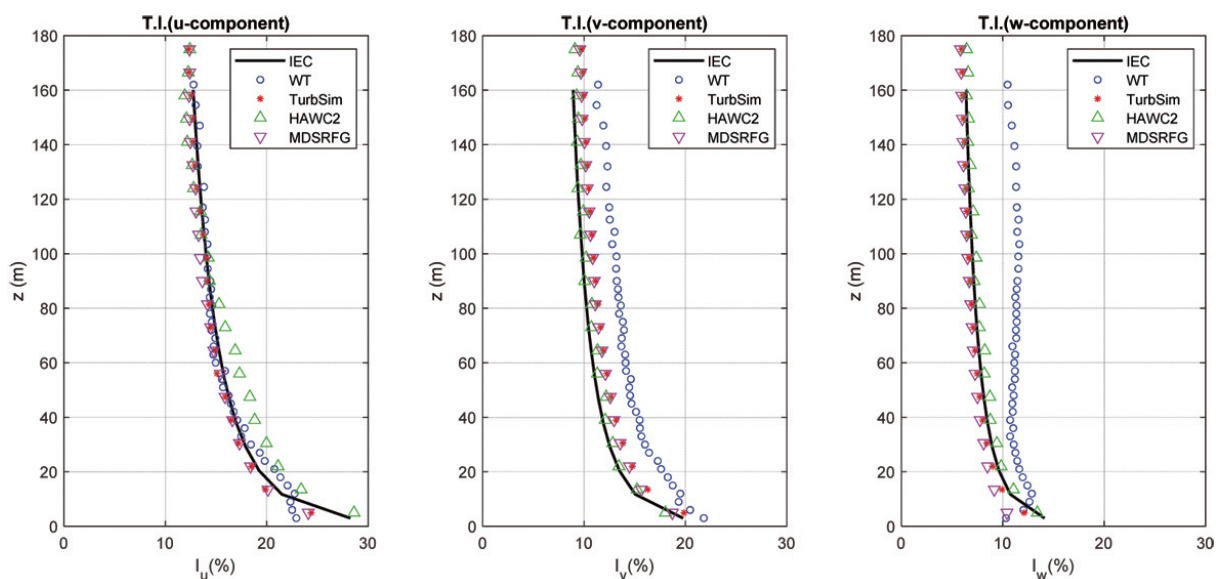


圖4 比較ETM風況之紊流強度剖面

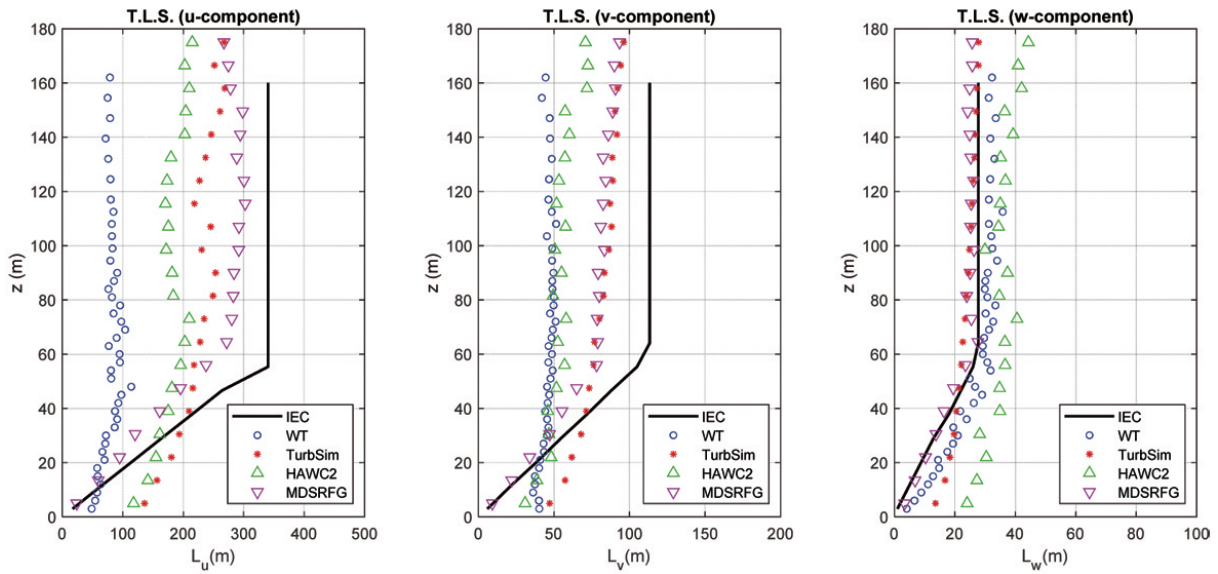


圖5 比較ETM風況之紊流積分尺度剖面

低。而相對於順風向，橫風向及垂直向紊流積分尺度在IEC規範中的定義為，在輪轂處約113公尺及28公尺。然而，風洞模擬之橫風向及垂直向紊流積分尺度若換算回實場的輪轂處，則約為80公尺及23公尺，亦較模擬目標略低。考慮採用TurbSim及HAWC2兩軟體模擬時，順風向、橫風向及垂直向的紊流積分尺度分別在輪轂處大約為200公尺、70公尺及20公尺。另外，MDSRFG於順風向、橫風向及垂直向的紊流積

分尺度分別在輪轂處大約為300公尺、100公尺及20公尺。從整體結果來看，以MDSRFG所獲得的結果在三個風向上均可以比較接近IEC規範所要求的紊流積分尺度剖面。

在風速頻譜的部分，IEC規範的風速頻譜是採用Kaimal風速頻譜。本文利用風洞模擬結果、MDSRFG、TurbSim和HAWC2所得到的擾動風速換算為風速頻譜後，與IEC規範比較如圖6所示。雖然因擾動風速稍有差異，使得

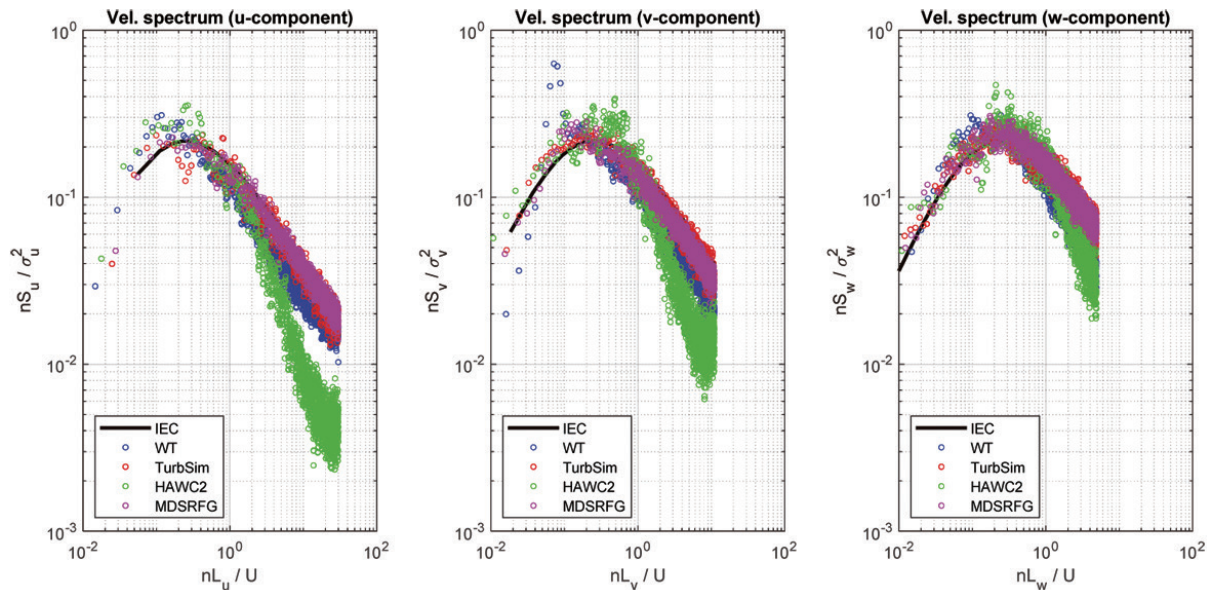


圖6 比較ETM風況之約化風速頻譜

頻譜的高度有些差異外，三者的風速頻譜的形狀，在較重要中頻區域，慣性次階區(Inertia subrange)，都符合Kolomogrove的理論特性，頻譜會正比於頻率的負5/3次方。以整體頻率範圍來看，似乎HAWC2在偏高頻率區域能量稍微下降，與其他三者有明顯的差異。除了風速頻譜外，兩點之間的風速交頻譜也通常是比較風場相似性的依據之一。然而，倘若任取空間中兩點位置的擾動風速歷時進行交相關函數的計算並繪製交頻譜圖，則無法完整地在本文有限的篇幅中呈現。因此本文僅以輪轂高度與其一半輪轂高度處之交頻譜，如圖7所示，來說明。圖中橫軸座標顯示為約化頻率範圍，縱軸座標顯示為相關係數。當約化頻率較低的時候，兩點之間的距離越低或者屬於低頻訊號，相關係數通常較高。主要的原因在於距離越近則風速相似性越高，低頻的特性通常也代表整體風場的趨勢。一般來說，當約化頻率逐漸升高到0.2的時候，相關性多半降至0.5以下，此為實場風速常有的衰減特性(Holmes and Bekele,

2021)。一般來說，交頻譜的比較在於檢核相關性是否具有衰減的特徵，而非要求必須具備高精度的疊合。對於實場風速之交頻譜，多半採用Davenport交頻譜公式，以指數律衰減的公式進行擬合。本研究以四種模擬方法的衰減趨勢均差不多，且符合Davenport公式的趨勢，故之後不再進行比較。相關的詳細資訊可以參考鄭啟明等(2015)。

(二) NTM風況之比較結果

此部分將模擬NTM風況的風速特性與IEC規範所定義之風速特性進行比較。圖8代表平均風速剖面，相同於ETM風況的模擬，風洞模擬亦採用1/150長度縮尺進行試驗，因此在比較時須將風洞試驗高度轉換為實場高度後，再與IEC規範進行比較。風速則採1/2.5速度縮尺進行試驗，亦須將轉換至實場風速。在圖8中，風洞試驗模擬風速與IEC規範進行比較時，在40公尺以下，風速稍有扭曲且稍高，在40公尺以上則維持固定風速並相似於IEC規範。此外，

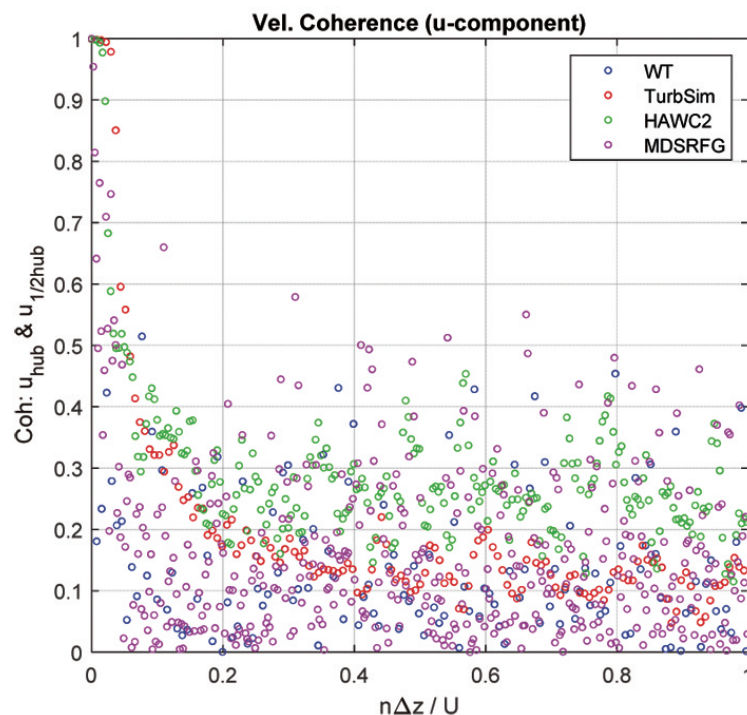


圖7 比較ETM風況之交頻譜(輪轂高度與一半輪轂高度處)

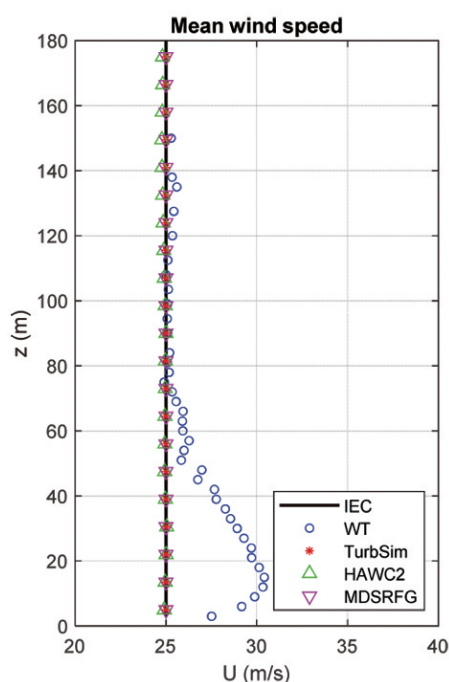


圖8 比較NTM風況之平均風速剖面

MDSRFG、TurbSim及HAWC2的模擬結果皆能與IEC規範相似。根據研究團隊經驗，NTM風況中的均勻平均風速剖面在實際的風場中是鮮少出現的，一般來說，指數值在東北季風或颱風期間均為正值，正常風情況下也多以正值出現。在對流旺盛的情況下，有機會會轉變為負值，但情況不多。

在紊流強度的部分，風速各項分量紊流強

度剖面圖如圖9所示，其中風洞模擬的順風向（縱向）紊流強度約介於9.5%~12%間，略低於IEC模擬結果11.7%，但差異不大。風洞模擬的橫風向紊流強度，則與IEC結果相當接近。風洞模擬的垂直向紊流強度約介於7%~9%間，略高於IEC規範的5.8%。而MDSRFG、TurbSim及HAWC2的模擬於各風向上的結果均能與IEC規範相似。

紊流積分尺度的比較結果如圖10所示，IEC規範所定義的順風向紊流積分尺度在輪轂處約為340公尺。風洞模擬的紊流積分尺度受限於風洞與格柵的尺寸，約為20公分至50公分，換算到實場約為30公尺至70公尺，較模擬目標為低。IEC規範定義的橫風向及垂直向紊流積分尺度在輪轂處為113公尺及28公尺，風洞模擬結果則約為13公尺至15公尺，皆較模擬目標為低。而TurbSim及HAWC2兩者的模擬結果相近，於順風向、橫風向及垂直向紊流積分尺度分別在輪轂處約為200公尺、80公尺及28公尺，略低於IEC標準，而MDSRFG於順風向、橫風向及垂直向紊流積分尺度分別在輪轂處大約為300公尺、100公尺及20公尺。從整體分布結果來看，風洞模擬的結果較TurbSim及HAWC2具

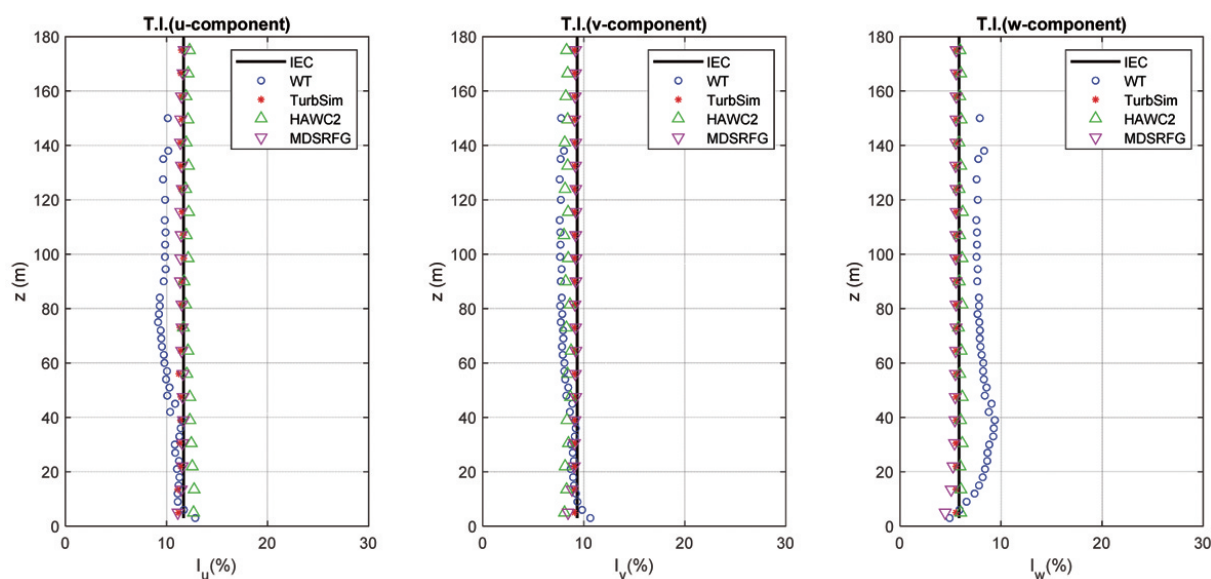


圖9 比較NTM風況之紊流強度剖面

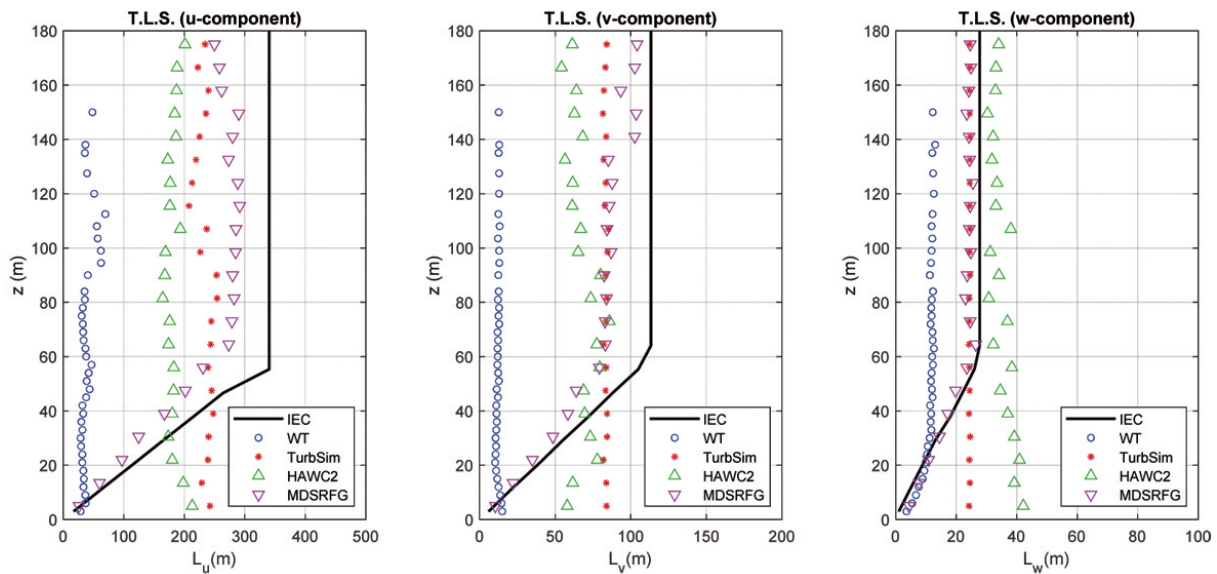


圖10 比較NTM風況之紊流積分尺度

較大差距，然而TurbSim及HAWC2的結果在較低高度為垂直分布，不如MDSRFG較貼近IEC規範要求的遞減分布。實際上，NTM風況的紊流積分尺度剖面無法在要求平均風速剖面指數為零的情況下，仍然呈現隨著高度增加的趨勢。

(三) EWM風況之比較結果

EWM風況的模擬結果與IEC規範的風速特性比較分別以圖11、12、13呈現平均風速剖面、紊流強度剖面、紊流積分尺度剖面。與前兩者風況不同之處在於，EWM風況主要是模擬颱風事件，因此風速是採1/5.2縮尺進行試驗，再轉換至實場風速進行比較。在圖11中，風洞模擬、HAWC2、MDSRFG三者模擬之風速在各個高度與IEC規範之風速剖面均相當接近。唯獨FAST V8版的TurbSim模擬所模擬的平均風速並不隨著高度增加，而呈現各高度均為相同之風速值。一般來說，在颱風期間的平均風速較高，其剖面多為指數0.1至0.12左右，不應直接假設為0。作者檢視NREL所公布的最新版本OpenFAST v3.1.0中的TurbSim模組發現，此問題已經被開發者發現並解決。本文所採用

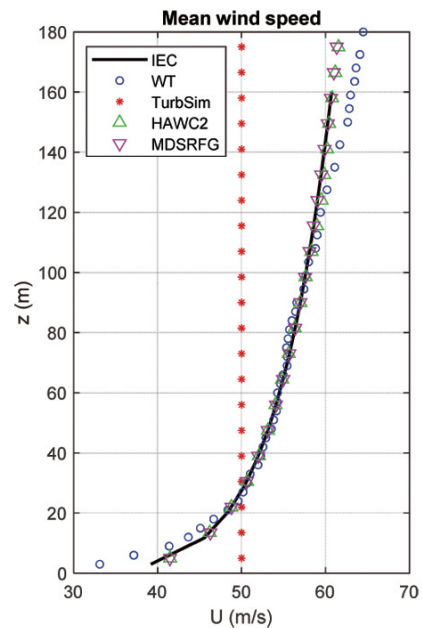


圖11 比較EWM風況之平均風速剖面

的TurbSim模組版本較舊，且並不符合自然現象。

紊流強度的部分，各分量的紊流強度剖面如圖12所示。四種模擬方式均在順風向(縱向)紊流強度呈現不錯的結果。風洞模擬結果約介於12%至25%之間，略低於IEC規範。風洞模擬的橫風向紊流強度約介於10%至20%間，略高於IEC規範的8%至15%範圍。相對於風洞模擬，MDSRFG及兩軟體均能有不錯的相似

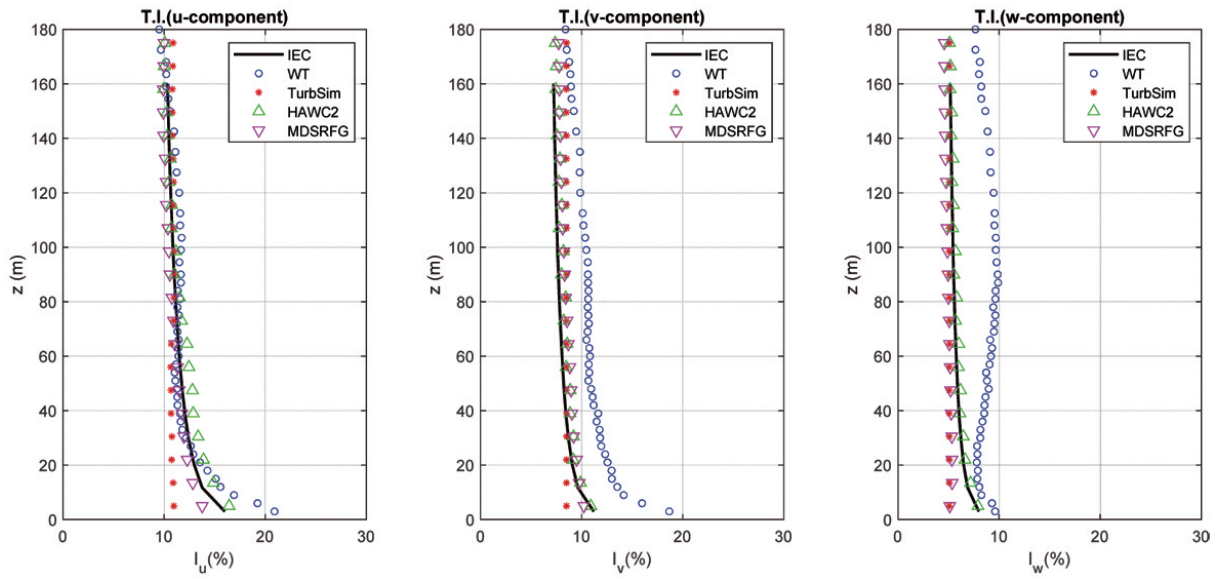


圖12 比較EWM風況之紊流強度剖面

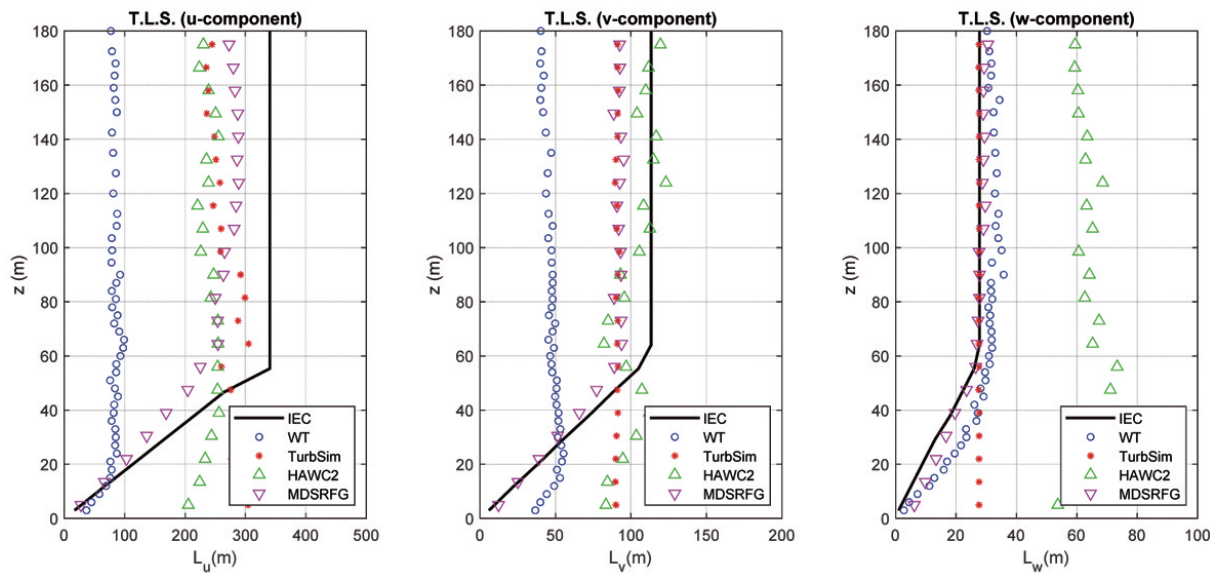


圖13 比較EWM風況之紊流積分尺度

性。風洞模擬的垂直向紊流強度約介於10%至12%間，高於IEC規範的6%至10%，特別是40公尺以上的模擬，似乎風洞模擬的紊流強度有偏高的現象，很可能受到上、下邊界層的影響或者是天車系統所造成的阻流。相同的。MDSRFG、TurbSim及HAWC2兩軟體的模擬皆與IEC規範相似。

比較EWM風況的紊流積分尺度(見圖13)、風速頻譜、以及交頻譜的模擬結果，均與NTM風況及ETM風況相同趨勢。換言之，無論是

penFAST、HAWC2兩軟體、或者風洞模擬，均難以產生較好的紊流積分尺度結果。

(四) EOG風況之比較結果

EOG風況主要在描述風速在短時間內上升又下降的特性，屬於非定常性的風速情境。未發生風速變化前的風速剖面以指數值0.2的指數律為主，與NWP風況相同。在風速發生非定常性變化期間，各高度的風速皆會發生變化，不同高度的風速隨時間之變化趨勢如圖14中的黑

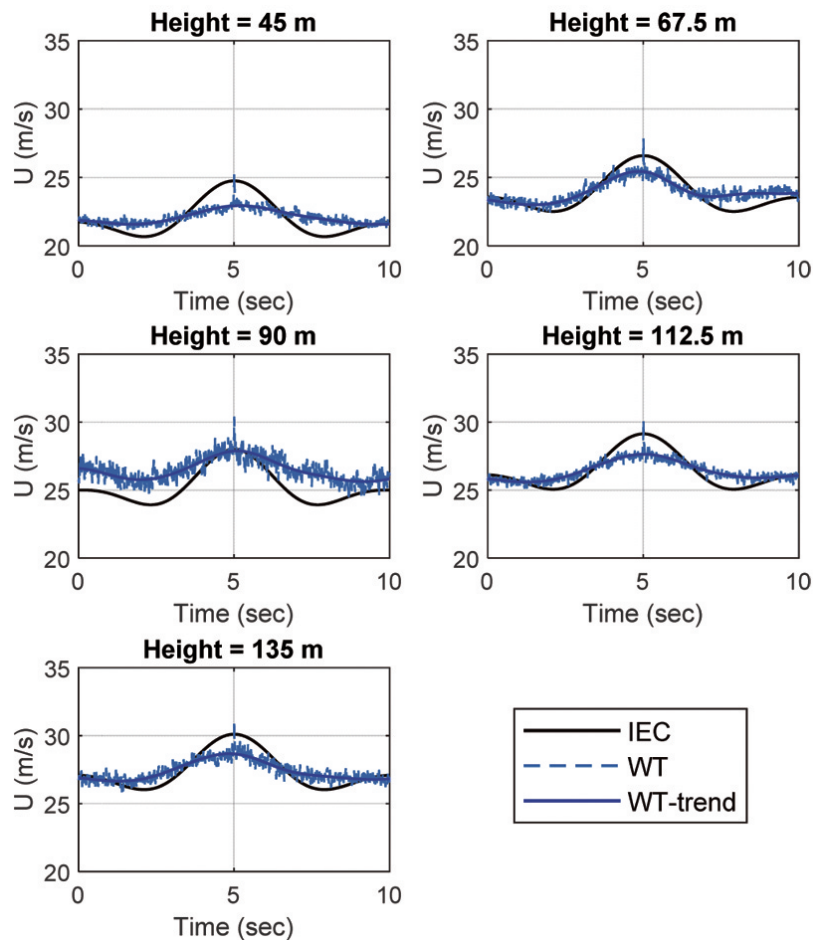


圖14 比較EOG風況各高度風速變化

色實線所示。由於要呈現此風況的特性變化，除了輪穀高度風速外，在略高於輪穀處及略低於輪穀處，各選取兩個高度，觀察其風速變化。在圖14中，選取實場高度45公尺、67.5公尺、90公尺(輪穀高)、112.5公尺、以及135公尺等5個高度進行觀察。由於風洞模擬的風速並非是一條平穩變化的曲線，而是平均風速及擾動風速的組合，因此風速會呈現在一個帶寬內擾動。約為風速的3%至4%程度的擾動，如圖中淺藍色虛線所示。而為了要表現出風速整體的趨勢變化，可以進一步將淺藍色虛線平滑化獲得圖中深藍色實線。比較深藍色實線及黑線可發現，風洞模擬的結果其隨著風速變化的趨勢大抵遵循IEC規範設定的目標，但是其絕對值略低於目標值。此外，以67.5公尺處的風速變化為例，一開始的風速下降及回升段，都能有

效模擬，但是後半段風速下降後再度回升的特性，風洞模擬就較無法模擬成功。此外，45公尺及135公尺兩處的風速變化趨勢與目標風速稍嫌偏離，而在接近輪穀處的三個高度的風速變化趨勢大致遵循目標風速變化。

反觀FAST及HAWC2兩軟體，除了前三節中的NTM風況、ETM風況、以及EWM風況外，均無提供模擬EOG風況的功能。本文並未加入非定常風況的模擬結果進行比較，然而基於MATLAB語言的MDSRFG可以預期反而可以簡單地透過程式撰寫，而達到EOG風況的風場歷時產生。

(五) EWS風況之比較結果

EWS風況主要在描述平均風速剖面在短時間內改變垂直或水平分布型態的特性。EWS

風況跟EOG風況類似，初始風速剖面也設定為NWP風況，指數值為0.2。對於垂直方向的變化來說，NWP風況會在12秒內指數瞬間增加(本文稱之為EWS+)，或者指數瞬間降低(本文稱之為EWS-)的兩種情況，對於設計者來說，則取此兩者造成較大結構反應的結果進行評估。然而，甚為可惜的是，本研究所採用的複數風扇風洞在水平方向上僅有六個風扇的變化，因此無法有效的進行IEC規範中所謂的水平分布型態的變化。以下僅探討垂直分布型態的兩種變化模擬結果。

圖15代表指數值在12秒內瞬間上升時，相對於實場45公尺、67.5公尺、90公尺(輪穀高)、112.5公尺、以及135公尺等5個高度的風速隨時間變化圖。從圖中可發現高於輪穀處的風速會

增加，而低於輪穀處之風速會下降，圖中黑色實線是IEC規範所規定的EWS+風況，以風洞模擬的風速並非是一條平穩變化的曲線，同樣是因為在風洞中的氣流並非完全無亂流的情形，顯示為圖中淺紅色虛線。為了要表現出風速整體的趨勢變化，因此把淺紅色虛線平滑化後，獲得圖中的深紅色實線。可發現其隨風速變化趨勢十分符合IEC規範設定的目標曲線。

圖16代表指數值在12秒內瞬間降低時，相對於實場45公尺、67.5公尺、90公尺(輪穀高)、112.5公尺、以及135公尺等5個高度的風速隨時間變化圖。從圖中可發現高於輪穀處之風速會下降，而低於輪穀處之風速會增加，圖中黑色實線是IEC規範所規定的EWS-風況，而風洞模擬的風速如圖中淺紅色虛線所示，圖中深紅

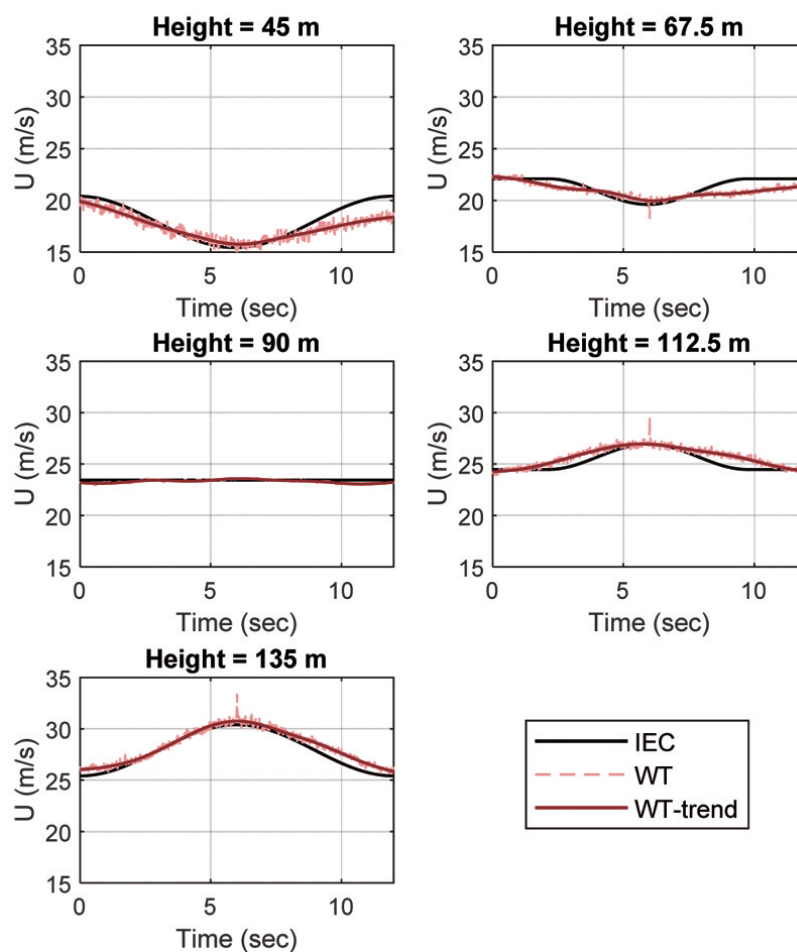


圖15 比較EWS風況為指數增加時各高度風速隨時間之變化圖

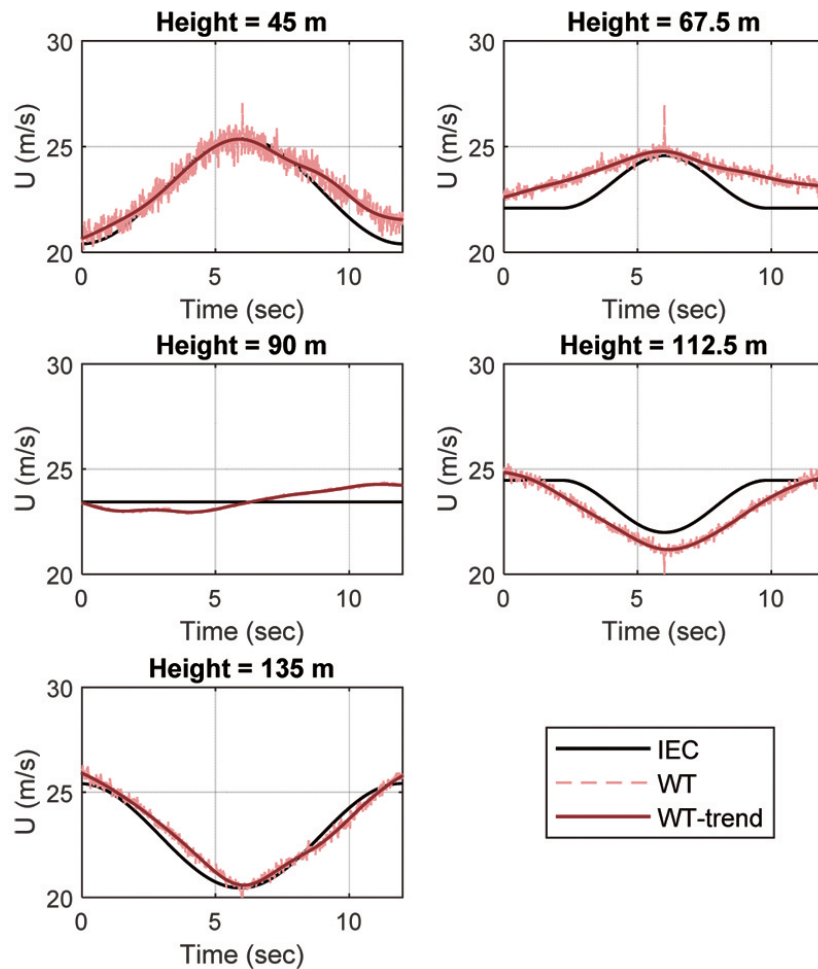


圖16 比較EWS風況為指數減少時各高度風速隨時間之變化圖

色實線則是移動平均後的結果。比較深紅、黑兩線可發現其隨風速變化趨勢同樣十分相符於IEC規範的要求。相較於同樣屬於非定常性的EOG風況，複數風扇風洞顯然較能模擬出符合EWS風況的特性，而在EOG風況略差。根據研究團隊過去建置風洞的經驗，倘若要提高EOG風況的模擬準確度，則必須提高複數風扇風洞的單元伺服馬達性能，從目前所能達到的 8 m/s^2 的加速度提升至 12 m/s^2 為較佳。此外，研究團隊認為，倘若要以風洞模擬的方式進行屬於非定常性風向瞬間變化的EDC風況或風速風向同時瞬間變化的ECD風況，則可以針對風洞試驗機具中用來設置縮尺模型的圓盤系統，進行適度的改造。例如將穩定緩速轉動的圓盤，改以可以快速轉動的伺服馬達來模擬結構體的瞬間

方向變化。一般來說，風洞所產生的氣流不容易改變其風向，因此可以改為強制轉變結構物的角度，以相對轉動的道理，同樣達成風向瞬間變化的IEC規範要求。由於此做法相對於其他風況的模擬較為複雜，故研究團隊將另撰文以詳細呈現其模擬比較成果。

在IEC規範61400-1中，採用了與圖15、16相同的繪圖方式進行EWS風況的解說。然而，為了讓讀者更能了解EWS風況在垂直分布上的變化，圖17顯示為複數風扇風洞模擬正、負指數的兩種定常風速剖面分布圖。圖中所示的 $y = 330$ 、 660 、 990 mm 是為複數風扇風洞側向位置座標，其中 $y = 660 \text{ mm}$ 為風洞正中心線。從圖17可以看到，理論值與模擬值具有相當高的重疊性，換言之，複數風扇風洞首先可以呈現

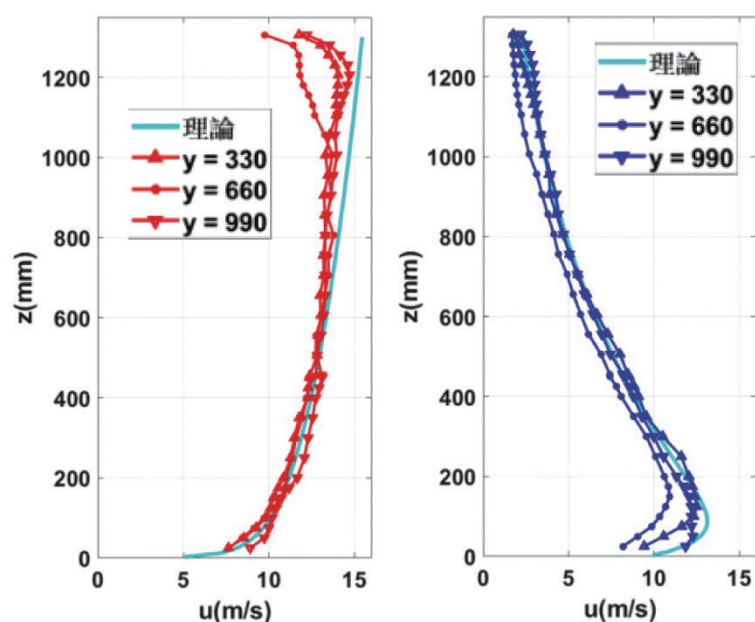


圖17 EWS風況中正負指數律的垂直分布風速圖(左：正指數；右：負指數)

出極好的定常風速剖面模擬效果。再者，所謂EWS風況中的垂直分布變化，其實就是一種由正指數風剖在數秒內轉變為負指數風剖，然後再於數秒內變回正指數風剖的一種非定常性氣流。本研究團隊在過去均已能利用伺服馬達的功能，完成此種轉換(李易，2020；羅元隆，2021)。

5. 結 論

以下分為幾個部分綜合本研究進行風場模擬的結果說明。

(一) 定常風場模擬

針對平均風速剖面的模擬，除了風洞模擬NTM風況之平均風速剖面在低風速區稍有差異，以及FAST V8版TurbSim模擬EWM平均風速剖面有明顯缺陷外，其餘採用風洞模擬、MDSRFG(MATLAB)、FAST、及HAWC2軟體來模擬平均風速剖面，均能大致符合IEC規範之規定。針對紊流強度剖面，除了風洞模擬有些微差距之外，其他三者的模擬結果大致上符

合IEC規範規定。而從紊流積分尺度剖面的比較結果，風洞模擬、MDSRFG (MATLAB)、OpenFAST、HAWC2模擬皆低於目標IEC規範，但MDSRFG尚稱接近。

針對約化風速頻譜及交頻譜的部分，雖然因擾動風速稍有差異，使得頻譜的高度有些差異外，風洞模擬、MDSRFG、FAST所產生的頻譜及交頻譜形狀，在較重要中頻慣性次階區都符合Kolomogrove的理論特性，僅HAWC2模擬結果較差。

(二) 非定常風場模擬

針對屬於非定常性風速變化的EOG風況及垂直EWS風況而言，由於複數風扇風洞受到伺服器馬達性能的限制，目前所能達成的加速度尚且無法完全模擬EOG風況，但已經可以模擬其趨勢特性。另一方面，針對垂直方向變化的EWS風況的模擬結果則相當接近目標曲線。然而IEC規範所定義的非定常風況中尚有水平變化風速的EWS風況、瞬間變化風向的EDC風況、以及綜合風速及風向同時變化的ECD風況三種，目前並非本研究所採用的複數風扇風洞

所能模擬。

(三) 綜合評述

整體而言，MDSRFG在所有風場特性的比較上，均呈現較好的模擬結果。風洞模擬方法雖然無法獲得較好的紊流積分尺度相似性，然而由於風力機尺寸相對於模擬結果的尺度大小較小，因此可以預測若採用風洞模擬的風場進行縮尺模型量測，紊流積分尺度的差異所造成的受力誤差應該不高。根據研究團隊經驗，主要誤差應當是來自於雷諾數的差異造成的風力係數變化，而導致的整體風力與實場有所不同。

比較本研究中所提及的三種模擬方式以及風洞實作方式，從採用時機而言，研究團隊認為模擬方式較適合於風力機進行初步設計階段，而風洞試驗適合於後續驗證階段。主要原因在於模擬分析做了許多簡化理論的假設，例如採用傳統的Blade Elementary Momentum (BEM)理論來計算氣動力載重，並忽略許多風力機與流場間的互制行為。另一方面，風洞試驗雖然採用了雷諾數不符的縮尺模型，但可以透過修正葉片剖面形狀的方式取得相近的風力係數進行試驗，獲得各種可進行模擬氣流下的氣動力量測。從使用者角度而言，針對非以風載重為主要的其他種類分析，工程師採用模擬方式可以較快獲得分析結果，且若結構反應尚在氣動彈性範圍內，則其模擬結果尚屬合理。對於葉片設計者來說，則多半仍會以合理的風洞試驗驗證初步模擬設計的結果。倘若以時間資源來說，當然是風洞試驗較為耗時耗費的作法。尤其是目前多半傳統的風洞僅能模擬一般正常穩態或屬於指數律的大氣邊界層剖面氣流。本研究所採用的主動控制式複數風扇風洞實驗機具在氣流模擬上不僅可以兼具傳統的大氣邊界層模擬，尚可進行部分非定常性氣流的

模擬。我國對於風力機的研究成就相較於歐洲國家尚屬起步階段，研究團隊認為學術研究應當採取多元化的作法，方能快速提升並因應目前急需的風力機產業發展所需。

參考文獻

- 李易，2020年。非定常性氣流剖面對高層建築風載重之初步研究，淡江大學土木工程研究所碩士論文。
- 鄭啟明，羅元隆，蔡明樹，林金賢，王軍翰與黃國峰，2015年。台灣地區強風作用時之大氣邊界層特性。中國土木水利工程學刊，第27卷第2期，第139-149頁。
- 羅元隆，2021年。科技部專題研究計畫(一般型研究計畫)，建築結構於非定常氣流下之風力特性研究。
- Castro, H.G., R.R. Paz and V.E. Sonzogni, 2011. Generation of turbulence inlet velocity conditions for large eddy simulation, *Mec. Comput.* XXX, 2275-2288.
- Holmes, J.D. and S.A. Bekele, 2021. *Wind Loading of Structures* 4th ed, CRC Press.
- Huang, S.H., Q.S. Li and J.R. Wu, 2010. A general inflow turbulence generator for large eddy simulation, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 98, 600-617. DOI: 10.1016/j.jweia.2010.06.002.
- IEC, 2019a. International Standard IEC 61400-1 Edition 4.0 2019-02 Wind energy generation systems – Part 1: Design requirements, International Electronic Commission, 2019.
- IEC, 2019b. International Standard IEC 61400-3-1 Edition 1.0 2019-04 Wind energy generation systems – Part 3-1: Design requirements for fixed offshore wind turbines, International Electronic Commission, 2019.

- Jonkman, J., S. Butterfield, W. Musial and G. Scott, 2009. Technical Report NREL/TP-500-38060 Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, National Renewable Energy Laboratory, 2009.
- Li, Y.C., C.M. Cheng, Y.L. Lo, F.M. Fang and D. Zheng, 2015. Simulation of turbulent flows around a prism in suburban terrain inflow based on random flow generation method, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.146, p51-p58. (SCI) DOI: 10.1016/j.jweia.2015.07.008.
- Natarajan, A., M.H. Hansen and S. Wang, 2016. Design Load Basis for Offshore Wind Turbines, DTU Wind Energy Report No. E-0133, 2016.

Feasibility Study of Applying Wind Tunnel Simulation Techniques to Reproduce Typical IEC Design Wind Conditions

Yuan-Lung Lo^{1*} Li-Kong Chen² Chung-Lin Fu³ Chieh-Hsun Wu⁴

ABSTRACT

This study has adopted four approaches to simulate wind conditions specified in IEC 61400-1 and 61400-3-1 codes for wind turbine designs. These four simulation approaches include the physical simulation technique via wind tunnel facilities and three numerical simulation techniques. For the physical approach, an actively controlled multiple-fan wind tunnel and a conventional boundary layer wind tunnel at Tamkang University are utilized for the flow simulation. The Cobra probe is used for wind speed measurements. For the numerical approaches, the TurbSim module in the open-source program OpenFAST developed by the National Renewable Energy Laboratory and the HAWC2 developed by DTU are conducted and compared with the self-developed MATLAB program based on the MDSRFG theory. For those stationary wind conditions, such as NTM, ETM, and EWM conditions, vertical wind profiles of mean wind speeds, turbulent intensities, and turbulent length scales are compared with the IEC codes and the speed spectra and co-spectra. Simulated wind time history signals by the multiple-fan wind tunnel are also compared for non-stationary wind conditions, such as EOG and EWS conditions. Results show that the TurbSim and the HAWC2 approaches do not reproduce the wind conditions fitting with the IEC codes very well. However, the self-developed MATLAB based on the MDSRFG theory can almost reproduce the IEC wind fields in genuinely good quality. Although the multiple-fan wind tunnel cannot reproduce the horizontal EWS condition and the EDC/ECD conditions, it shows a good agreement in simulating the vertical EWS condition and the EOG condition. The multiple-fan wind tunnel provides a good reference tool for validation of the wind field simulation and the further possible aerodynamic force measurements.

Keywords: IEC, Wind tunnel test, TurbSim, HAWC2, MDSRFG.

¹ Associate Professor, Dept. Civil Engineering, National Taipei University of Technology.

² Graduate Student, Dept. Civil Engineering, National Taipei University of Technology.

³ Researcher, Wind Engineering Research Center, Tamkang University.

⁴ Assistant Professor, Dept. Civil Engineering, Tamkang University.

*Corresponding Author, Phone: +886-(0)2-2771-2171#2680, E-mail: yllo@mail.ntut.edu.tw

Received Date: October 13, 2022

Revised Date: December 29, 2022

Accepted Date: January 10, 2023