

# 利用 OpenFAST 分析臺灣風力機塔架之陣風響應因子特性

廖韋鑫<sup>1</sup> 簡慶文<sup>2\*</sup> 張景鐘<sup>3</sup> 盧南佑<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 國立臺灣大學機械工程學系 研究生

<sup>2</sup>\* 國立臺灣大學能源研究中心（前）研究員

<sup>3</sup> 國立臺灣海洋大學河海工程學系 教授

<sup>4</sup> 國立臺灣大學機械工程學系 助理教授

## 摘要

臺灣地處颱風頻繁侵襲之區域，風力發電機塔架（Wind Turbine Towers，WTTs）面臨嚴峻的結構安全挑戰，對於我國推動離岸風電發展及實現淨零碳排目標構成潛在風險。由於目前針對 WTTs 在極端風況環境下的耐風設計（Wind-Resistant Design，WRD）標準化程序仍有不足，因此本研究聚焦於颱風條件下 WTTs 的動態響應，進一步探討其陣風響應特性，作為 WRD 設計準則之依據。本研究以美國國家再生能源實驗室（National Renewable Energy Laboratory，NREL）開發之 5MW 風機作為研究模型，採用 IEC 規範中的 Kaimal 風速功率譜密度，並結合隨機振動理論，計算塔頂位移之動態響應，進而推導基於位移的陣風響應因子（Displacement Gust Response Factor，DGRF）。為驗證 DGRF 計算結果之準確性，本研究透過 TurbSim 產生具統計特性之時域風速資料，輸入至 OpenFAST 數值模擬平台建立之完整風力機模型進行分析，並將模擬所得塔頂位移結果與 DGRF 理論預測結果進行比較，以評估其應用可靠性，結果顯示，在風速為 57 m/s 時，兩者計算之陣風響應因子（Gust Response Factor，GRF）誤差為 4.7%。本研究可補足現行 WRD 於強風區域應用之不足，提供具在地風場特性的設計依據，亦可作為臺灣離岸風電開發及相關設計規範修訂之參考依據。

**關鍵字：**陣風響應因子、功率譜密度、耐風設計

Keywords: Gust Response Factor, Power Spectral Density, Wind-Resistant Design

## 1. 前言

臺灣地處於颱風頻繁侵襲之區域，WTTs 在極端颱風條件下的結構安全更為關鍵，近年已有多起因強風導致風力設施受損的案例，如 2008 年薑蜜颱風（Jangmi）侵襲期間，導致台中港區高美濕地風力發電機組發生塔架斷裂事故，此類事件凸顯颱風對風力發電設施的潛在威脅，亦反映提升風機抗颱風特性的評估與設計之重要性。為將隨機風致效應轉換成規範可用的設計值，風工程領域普遍採用 GRF。Davenport (1967) 基於隨機振動與影響函數法之關聯，提出經過修正的陣風負載係數（Gust Loading Factor，GLF）框架。Holmes (2001) 進一步將 GRF 的擾

動分量分為背景（非共振）與共振兩部分，以一階模態評估順風向響應，並指出高聳、纖細結構須採用隨高度變化的 GRF，而非單一常數。另外，在非定常風情況下，使用假設定常隨機的 GRF 可能失準，因此 Kwon 等 (2012) 提出陣風前緣因子 (Gust-Front Factor)，以補強在極端風況事件中的設計描述。簡慶文等 (2025) 提出的 DGRF，並以 WTTs 結構為研究模型，分析該結構在不同風速功率譜及不同風速條件下塔頂的順風向位移響應，進行 DGRF 的計算，依此作為風機結構設計的依據。

本研究採用由 Jonkman 等 (2009) 提出之 NREL 5MW 風機作為研究模型，並以 DGRF 計算該風機在不同風速條件下塔頂的順風向位移響應，另外，透過 TurbSim 生成具統計特性之紊流風場，並透過 OpenFAST 建立之完整風機模型，導入 TurbSim 生成的紊流風場，以進行風機結構動態分析，以評估 DGRF 於極端颱風風場下之適用性與可靠性。

## 2. 研究方法

### 2.1 風機模型及運動方程式

本研究所採用之風機模型為 NREL 5MW 風力發電機，該風機參數如表一所示，由於本研究聚焦於極端風況下之結構響應，考慮之平均風速均超過風機的切出風速，因此，研究中將風機設定為停機狀態，並將葉片俯仰角固定為 90 度。於研究中，將 WTTs 視為單自由度的線性系統，此外，由於具有低頻的風速包含了功率譜密度中的大部分能量，因此假設其動態響應主要由第一模態主導，忽略更高階模態之影響，在此架構下，塔頂位移的運動方程式可表示為：

$$m_1 \ddot{x} + 2m_1 \zeta (2n_1 \pi) \dot{x} + m_1 (2n_1 \pi)^2 x = P(t) \quad (1)$$

其中  $x$  為塔頂位移， $m_1$  為第一模態廣義質量， $\zeta$  為阻尼比， $n_1$  為第一模態自然頻率， $P(t)$  為外部風力，並假設第一模態形狀函數  $\phi_1(z)$  隨高度呈線性變化可表示為：

$$\phi_1(z) = z/H \quad (2)$$

其中  $z$  為任意高度， $H$  為 WTTs 高度。

### 2.2 DGRF

為分析 WTTs 的 GRF，本研究採用簡慶文等 (2025) 提出的 DGRF，並在此基礎上加以改進後進行計算，該方法是基於 Davenport (1967) 所提出之 GRF 理論，並結合隨機振動理論，同時將背景響應與共振響應納入考量，並藉由峰值因子推估結構於紊流激發下之最大位移響應。在隨機振動理論中，風速、風壓及結構響應被視為定常隨機過程，可分解為平均分量及擾動分量進行表示：

$$U(t) = \bar{U} + u'(t) \quad (3)$$

其中  $U(t)$  為瞬時風速， $\bar{U}$  為 10 分鐘的平均風速， $u'(t)$  為擾動風速，因此，結構所受之順風向總阻力  $F(t)$  可表示為：

$$F(t) = \bar{F} + f'(t) = \frac{1}{2} \rho_a \cdot [\bar{U}^2 + 2\bar{U} \cdot u'(t) + u'^2(t)] \cdot A \cdot C_d \quad (4)$$

其中  $\rho_a$  為空氣密度，於研究中設定為  $1.225 \text{ kg/m}^3$ ，結構之迎風面積以  $A$  表示，包含塔柱與葉片之迎風面積總和， $C_d$  為阻力係數， $\bar{F}$  與  $f'(t)$  分別為平均阻力與擾動阻力，兩者表示如下：

$$\bar{F}(z) = \frac{1}{2} \rho_a \left[ C_{d,tower} \cdot \int_0^H \bar{U}^2(z) \cdot D(z) dz + \frac{3}{2} \bar{W}^2 \cdot C_x \cdot c \cdot \sin(\varphi) \right] \quad (5)$$

$$f'(z,t) \equiv \rho_a \cdot \bar{U}(z) \cdot u'(z,t) \cdot A \cdot C_d \quad (6)$$

其中  $C_{d,tower}$  為塔柱的阻力係數， $D(z)$  為高度  $z$  處的塔住直徑， $\bar{W}$  為葉片入流風速， $c$  為葉片弦長， $\varphi$  為入流角， $C_x$  為葉片法向力係數，可由葉片的升力係數與阻力係數根據攻角的關係線性組合而得，用以描述葉片在順風方向所承受的等效空氣動力。

根據隨機振動理論，風速功率譜密度  $S_u(n)$  經由空氣動力導納函數  $\chi(n)$  及機械導納函數  $H(n)$  轉換後，可得到結構位移響應之頻譜密度  $S_x(n)$ ，並可計算位移變異量  $\sigma_x^2$  如下所示：

$$\sigma_x^2 = \int_0^\infty S_x(n) dn = \frac{4\bar{F}}{k^2 \bar{U}} \int_0^\infty |H(n)|^2 \cdot \chi^2(n) \cdot S_u(n) dn \quad (7)$$

其中  $k$  為風機結構的第一模態勁度，而  $\sigma_x^2$  可拆分為兩個分量近似表示，分別為背景響應的變異數  $\sigma_{x,B}^2$  及共振響應的變異數  $\sigma_{x,R}^2$ ，最終，DGRF 可表示為：

$$G = \frac{X_{\max}}{\bar{X}} = 1 + \frac{x'}{\bar{X}} = 1 + \frac{\sqrt{(g_B \cdot \sigma_{x,B})^2 + (g_R \cdot \sigma_{x,R})^2}}{\bar{F}/k} \quad (8)$$

其中  $G$  為陣風響應因子， $X_{\max}$  為預期最大位移， $\bar{X}$  為平均位移， $x'$  為擾動位移， $g_B$  及  $g_R$  分別為背景峰值因子及共振峰值因子，反映隨機過程中極值與標準差之間的統計關係。

### 2.3 TurbSim 參數設定

本研究採用 TurbSim 軟體生成隨機紊流風場，作為後續模擬分析之輸入。風場紊流模型採用 IEC 61400-1 標準所定義之 Kaimal 模型，總模擬時間為 830 秒，參考高度則根據 NREL 5MW 風機之輪轂高度設定為 90 公尺，並於此高度設定四種平均風速進行模擬，分別為 25、35、45 與 57 m/s，其中 25 m/s 為 NREL 5MW 風機之切出風速，作為模擬起始條件；35 與 45 m/s 為颱風中常見的風速範圍；而 57 m/s 則依 IEC 61400-1 標準中 Class T 分級的設計極端風速設定，此風速組合可同時涵蓋風機停機狀態與規範極端條件下之結構響應。

### 2.4 OpenFAST 參數設定

本研究採用 OpenFAST 軟體，以完整模擬 NREL 5MW 風機在極端風況下之動態響應，所使用之 OpenFAST 架構包含 InflowWind、AeroDyn、ElastoDyn 以及 ServoDyn 四項模組，以完整呈現風機在停機條件下之受力與響應特性。在 InflowWind 模組中，風場來源設定為三維隨機風

速場，並匯入由 TurbSim 軟體生成之\*.bts 格式檔案，以模擬風機在亂流條件下的入流特性。ElastoDyn 模組則負責模擬風機結構之動態響應，包含塔柱與葉片等主要構件的彈性行為，在本研究中，轉子轉速設定為 0 rpm，三支葉片之俯仰角均設定為 90 度，以代表風機處於完全停機狀態。將 ServoDyn 中的變槳控制模式設定為 0，以關閉主動控制功能，確保模擬過程僅呈現結構與氣動負載的被動響應。

### 3. 研究結果

#### 3.1 塔頂位移誤差比較

本研究探討在 25、35、45 與 57 m/s 四種不同風速條件下，分別以 DGRF 計算所得之最大位移  $X_{\max}$ 、平均位移  $\bar{X}$  及擾動位移  $x'$  位移結果，並與 OpenFAST 模擬結果進行比較分析。於 OpenFAST 模擬中，各風速條件皆進行 100 次隨機紊流場模擬，並輸出塔頂順風向位移時序資料，為避免初始階段可能存在之暫態效應對分析結果造成干擾，前 200 秒數據將視為暫態期而予以排除，分析則採用後續之 600 秒數據，以確保統計結果的可靠性，並由時序資料計算最大值、平均值及擾動值（即最大值與平均值之差），將 100 組模擬結果取平均與 DGRF 計算結果進行比較。表二為透過 DGRF 與 OpenFAST 模擬所計算之最大位移、平均位移及擾動位移的結果及誤差比較，最大位移的結果顯示兩者方法之間的整體誤差均低於 5%。平均位移的結果顯示，平均位移部分在低風速（25 與 35 m/s）下誤差較高，分別達 18.5% 與 9.3%，但在高風速條件（45 與 57 m/s）下，誤差則顯著下降至 4.4% 與 1.1%，顯示隨風速增加，理論計算與數值模擬之間的差異逐漸縮小。擾動位移的結果顯示，四種風速情境下的誤差約在 7% 至 13% 之間。

#### 3.2 背景響應與共振響應

根據 DGRF，擾動位移可進一步分解為背景及共振兩部分，並計算兩者對擾動位移之貢獻，圖一顯示在 25、35、45 與 57 m/s 風速條件下，背景與共振響應於總擾動位移中之相對貢獻比例。結果顯示，風速 25 m/s 時，背景成分佔比為 68.42%，為總擾動響應的主要來源，然而，隨著風速提升，共振響應逐漸增強，其貢獻比例在 45 m/s 開始時已超過 40%，但是背景響應仍維持較高的貢獻，因此，於強風情況中，共振響應的佔比雖有增加，但背景響應依然佔有高的影響，顯示結構之擾動位移響應仍同時受到背景與共振響應交互作用的影響。

#### 3.3 GRF 之比較

根據表二中最大位移及平均位移的計算結果，並結合式（8）所定義之 DGRF，計算不同風速下 GRF，表三為不同風速下 DGRF 與 OpenFAST 模擬計算之結果，結果顯示兩者在整體趨勢上均隨著風速增加而上升，在 25 m/s 風速下，OpenFAST 與 DGRF 所得結果差異最大，誤差 17.27%，而隨著風速提升至 57 m/s，誤差降低至 4.69%，顯示高風速條件下兩者結果更為接近。

### 4. 結論

本研究針對 NREL 5MW WTT 於極端風況條件下之結構響應及 GRF 進行探討，並採用 DGRF 進行計算，透過與 OpenFAST 數值模擬結果比較，以評估 DGRF 之適用性及準確性。在位移的計算結果比較中，本研究分別比較位移的最大值、平均值及擾動值，在最大位移的部分，

DGRF 計算與 OpenFAST 模擬間的誤差皆低於 5%，結果顯示在整體上具有合理的一致性。平均位移則顯示於風速為 25 與 35 m/s 時誤差較大，但隨風速增加至 45 與 57 m/s 時，誤差下降至 5% 以內，顯示高風速條件下 DGRF 與模擬結果更為接近。而擾動位移的誤差維持於 7 至 13%，相對於前述有較大的誤差，可能與紊流擾動的隨機性及 DGRF 模型簡化假設有關，顯示該方法在動態擾動量的計算上仍可進行修正。

在背景與共振響應的分析中，背景響應在低風速時為擾動位移的主要來源，然而隨風速提升，共振響應也隨之漸增，顯示結構動態響應受到共振響應的影響漸增，且結構自然頻率與紊流能量分布間的耦合效應愈加顯著。而從不同風速下計算所得之 GRF 結果顯示，OpenFAST 與 DGRF 皆隨風速上升而增加，且在 25 m/s 時兩者差異最大，誤差 17.27%，但隨風速增加至 57 m/s 時，誤差顯著下降至 4.69%，顯示 DGRF 能較可靠地描述高風速條件下結構的位移響應。

因此，根據以上結果可知，DGRF 在高風速條件下具有合理之應用潛力，較能有效呈現 WTTs 之位移響應特性，並可作為強風區域風機 WRD 之參考工具，對於提升臺灣離岸風電之結構安全設計具有實際應用價值。

## 5. 參考文獻

- [1] 簡慶文、江茂雄、張景鐘、盧南佑、廖韋鑫，“風力發電機塔架抗颱風設計之陣風反應因子研究”，「第三十七屆中國造船暨輪機工程研討會」，2025 年，台灣大學，台北，台灣。
- [2] Davenport, A.G. “Gust loading factors”, *ASCE Journal of the Structural Division*, 1967, Vol.93, pp11-34.
- [3] Holmes, JD. *Wind Loading of Structures*, 3rd Ed., Spon Press, London, UK, 2001.
- [4] Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., and Scott, G., *Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development*, National Renewable Energy Laboratory, 2009
- [5] Kwon, D. K., Kareem, A., and Butler, K. “Gust-front loading effects on wind turbine tower systems”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2012, Vol.104-106, pp109-115

表一：NREL 5MW 風機模型基本參數

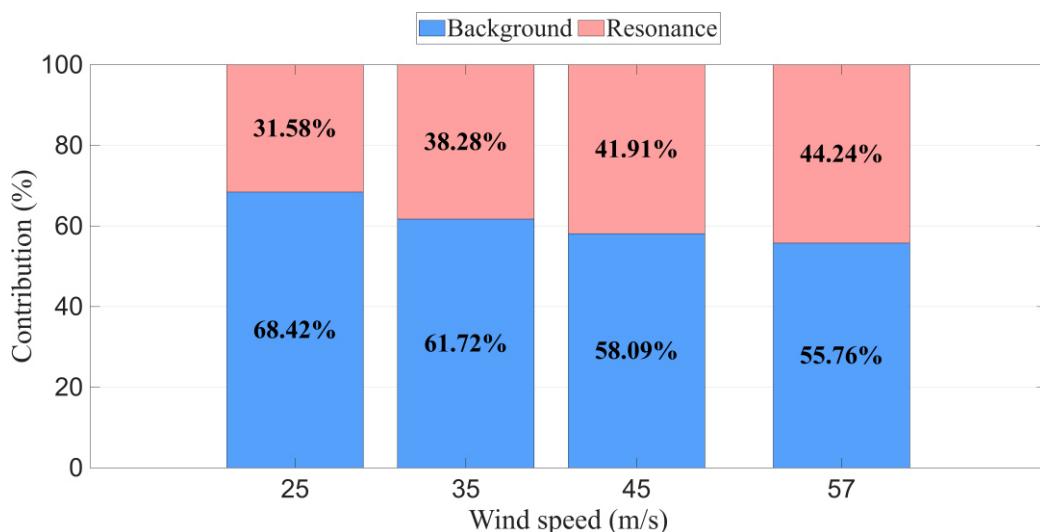
Parameter	Value	Unit
Rating	5	MW
Number of blades	3	-
Rotor, hub diameter	126, 3	m
Tower top, tower base diameter	3.87, 6	m
Tower, hub height	87.6, 90	m
Rotor, nacelle, tower mass	110000, 240000, 347460	kg
1st tower fore-aft natural frequency	0.324	Hz
Structural damping ratio	1	%

表二：DGRF 與 OpenFAST 模擬之結果及誤差比較

	風速(m/s)	DGRF (cm)	OpenFAST (cm)	誤差(%)
最大位移	25	11.68	12.22	4.45
	35	23.61	23.21	1.76
	45	39.58	37.97	4.24
	57	64.13	61.93	3.54
平均位移	25	5.37	6.59	18.52
	35	10.52	11.60	9.25
	45	17.39	18.20	4.42
	57	27.91	28.22	1.09
擾動位移	25	6.31	5.63	12.02
	35	13.09	11.61	12.77
	45	22.19	19.77	12.21
	57	36.22	33.72	7.42

表三：DGRF 與 OpenFAST 模擬之陣風響應因子  $G$  結果及誤差比較

風速(m/s)	DGRF	OpenFAST	誤差(%)
25	2.18	1.85	17.27
35	2.24	2.00	12.14
45	2.28	2.09	9.07
57	2.30	2.19	4.69



圖一：不同風速條件下背景響應與共振響應對擾動位移之相對貢獻比例比較