

極端風況下風力機之結構負載分析與操作策略

劉瑞弘

南臺科技大學機械工程系

dofliu@stust.edu.tw

摘要

台灣多颱風的極端氣候對風力機造成很大的威脅。2015年8月初，蘇迪勒颱風(Shoulder)造成台中港區風場風力機組的嚴重破壞，多部機組倒塌或損毀。面對未來變化多端、越來越強烈的極端氣候，風力機的監控操作與運轉維護要如何因應，有必要進行深入的研究分析探討，並提出可能的因應方案。根據本研究分析，由於轉向系統的故障，導致機組無法迎風轉向(Yawing)，使機組結構面臨極端異常的負載，進而導致葉片旋角機構被破壞。轉向系統(Yaw system)與旋角(Pitch system)系統在惡劣氣候下直接面對風的強大負載，是系統結構安全的第一線。因此本文針對兩個次系統進行詳細的受力負載分析，瞭解這兩個次系統所能承受的負載，並提出自保方法，可給予未來新設機組的設計參考。

關鍵詞：風力發電機、結構負載、操作策略、旋角系統、轉向系統

Operation Strategy and Load Analysis of the Wind Turbine under Extreme Wind Conditions

Jui-Hung Liu

Department of Mechanical Engineering, Southern Taiwan University of Science and Technology

Abstract

Extreme weather such as very strong typhoons is a big threat to the wind turbines in Taiwan. In 2015, Typhoon Shoulder caused severe damage to the wind turbines near Taichung Harbor. As the weather is getting much stronger in the future, the solution to the operation and maintenance for wind turbines is very important and necessary. In this paper, the root cause of the failure has been found. The breakdown of the yaw system stopped the yaw motor and resulted in an abnormal overload to the blade pitching mechanism. The excessive load to the yaw and pitch system should be carefully evaluated under such extreme wind conditions. This paper gave thorough load analysis of these two sub systems and verified the possible ultimate load. Finally, this research devised a safer operation strategy which can be used as a design model for future new wind turbines.

Keywords: Wind Turbine, Structure Load, Operation Strategy, Pitch System, Yaw System

壹、前言

台灣颱風多發生在每年的5月到12月，其中又以7、8、9月次數最多統計[1]。面對如此多變化極端氣候的台灣，風力機如何存活更顯重要。其中以蘇迪勒(Shoulder)颱風為例，蘇迪勒颱風是104年度第13號颱風，於花蓮縣登陸，雲林縣臺西鄉出海。這樣的颱風路徑對台灣北部與中部地區造成直接的影響[2]。圖1為颱風資料庫網站[3]上查詢到的本次颱風路徑資訊，清楚看到在離開台灣前有幾個明顯的路徑方向轉折(兩個虛線圈圈處)。在104年08月07日23:00至08月08日02:00發生轉向，從西向突然轉到西南向，這時間是發生瞬間風速33.8 m/s的時間點。若是以梧棲氣象站風速計高度33公尺，換算到風力機艙64公尺高度，風速大約為38.6 m/s (shear exponent=0.2)。當天凌晨04:00到07:00之間，又轉向為西北向，這時發生本次最大風速的區間54.2 m/s (梧棲測站33公尺)，換算至風力機高度68公尺的等效風速約為61.8 m/s。這樣的風速已經微微超過蒲福風級中最高的17級風(56.1 m/s~61.2 m/s)，亦超過風力機設計規範IEC 61400-1中[4]，等級Class II的極限陣風(59.5 m/s)，很可能因此而導致台中港區風場，有6部機組倒塌、1部機組的一支葉片毀損，總共有7部機組對外部可視結構造成破壞。根據現場照片顯示，倒塌的6部機組都是往南的方向倒塌(如圖2所示)，此倒塌方向與所得風況資料[5](如圖3所示)，風向350度的近正北風向符合。而氣象局的梧棲測站距離Z72港區風場的距離，直線距離約5.54公里(如圖4所示)，以颱風的尺度來說，風況差距不會太大，非常接近港區風場整體平均風況。但每部機組其實受設置點的地形地貌影響，實際上還是得從機組資訊中來確認。

此事故突顯了台灣多颱風氣候的特殊性，也因此國際電工委員會(IEC, International Electrotechnical Commission)下的風力機設計標準維護小組(TC 88 MT1, Technical Committee Maintenance Team 1)在最近幾年已經著手針對颱風此類熱帶氣旋可能對風力機結構的影響進行設計準則的修訂，各國包含美國、日本、韓國、台灣等皆收集並研究分析了該國極端氣候的資料觀測或是分析結果[6-12]，得出此類氣候的風速與模式的確已經超過原本設計規範中所列的最高等級，表示原有設計可能不足以應付這類的極端氣候。在這樣的狀況下，已經安裝且運轉中的機組，面對未來變化多端、越來越強烈的極端氣候，應該要有針對颱風氣候設計的一種操作策略，使風力機在較特殊風況的情形下能夠自主保護，以降低此一故障事件的風險，對於後續各項連續發生的故障也才能夠有效阻絕。

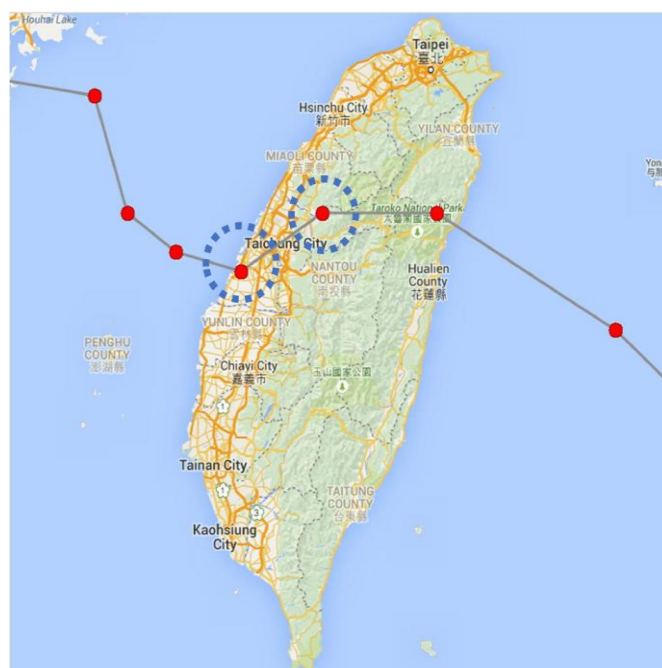


圖1 蘇迪勒(Shoulder)颱風路徑發生轉折的兩個關鍵點[3]



圖2 台中港區風力機組配置與倒塌方向示意圖

風速查詢設定

時資料 日資料

最大平均風 >= --- 級風 / --- m/s

最大陣風 >= --- 級風 / --- m/s

颱風年度

年度 [2015] 颱風: [蘇迪勒(SOUD)]

年度 [2015] -- 年度 [2015]

顯示 10 筆記錄

颱風編號	颱風名稱	測站	最大平均風速	最大平均風向	最大平均風發生時間	瞬間極大風速	瞬間極大風向	瞬間極大風發生時間
201513	蘇迪勒 (SOUDELOR)	467770 梧棲	20.7	350.0	2015-08-07 22:02:00	33.8	350.0	2015-08-07 23:41:00
201513	蘇迪勒 (SOUDELOR)	467770 梧棲	32.4	350.0	2015-08-08 05:56:00	54.2	350.0	2015-08-08 05:05:00

目前記錄: 1 至 2, 總筆數: 2

圖3 梧棲氣象站測得之蘇迪勒颱風風況[5]

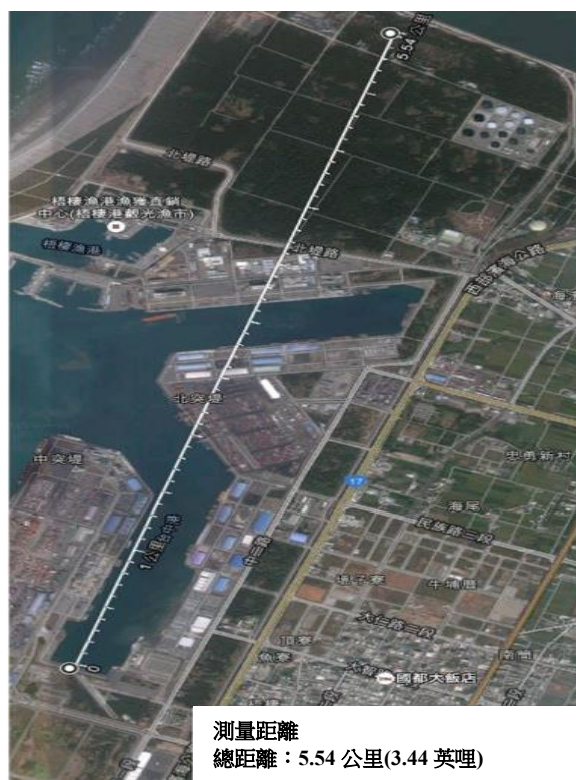


圖4 台中港區與梧棲氣象站直線距離

貳、系統規格說明

一、事故說明

本次颱風造成台中港區 18 部機組中的 6 部機組倒塌，另有 1 部機組為葉片損毀；為詳細釐清風力機組倒塌原因，擷取風力機原廠於每部機組電器室控制櫃中所配置的 RIU(remote intelligent unit)收集資料最為詳細，是風力機組倒塌最有效且有根據的證據；取樣頻率達一秒鐘一筆，記錄運轉資料與事件發生時間的警告訊息。從資料來判讀機組倒塌前的實際狀況是最為精準的，因為倒塌以及期間發生的一連串故障事情可能是 5 秒鐘甚至更短 3 秒內就發生的事情，如果以一般取樣頻率超過 10 秒鐘的監測系統來進行判讀，將無法釐清關鍵時間點所發生的事情經過。

但由於颱風過後，為保護機組與進行事故調查，因此風場維持停電。復電後，新資料將颱風期間資料覆蓋，部分機組的資料不夠完整無法得到最完整的分析。所幸 H01 的資料相對完整，透過交叉比對進行驗證，資料顯示事故發生的起點在於轉向馬達的安全開關跳脫，使機組無法迎風轉向(此時馬達與轉向剎車皆啟動)，機組結構面臨極端異常的負載，導致葉片旋角機構遭到強大負載而被破壞。在無法固定於安全角度狀態下，葉輪轉子(Rotor)轉速幾乎無限制地往上升，隨著塔架劇烈搖晃振動，在某個臨界點結構的振動使塔架與其固定螺栓無法承受而斷裂，機組進而倒塌。

根據現場觀察與一些照片顯示，倒塌的 6 部風力機都是往南的方向倒塌，此方向與前述圖 4 所得的風況資料，風向 350 度的近正北風向符合。其中 H12 葉片斷裂後甩出的方向相反，由南往北(如圖 2、3 所示)，也符合該機組破壞時間，為 8 月 8 日接近中午時分，當時颱風已離開本島，風向轉變。基本的機組倒塌狀況如表 1 所列。

表 1 Z72 港區機組倒塌情形

編號	破壞點與情況	破壞主因	破壞方向	時間	肇因說明
H01	於上塔架與中塔架連結處，倒塌	轉速飆升	南	104/08/08 03:06:12	轉向系統跳脫不迎風，機艙背風向，葉片旋角機構承受過大轉矩，導致葉片旋角機構破壞，無法固定於安全角度，轉速飆升，塔架劇烈振動後，從塔架螺栓連結面開始破壞而倒塌。
H04	於中塔架與下塔架連結處，倒塌	轉速飆升	南	104/08/08 05:33:34	大致與 H01 相同。轉向系統跳脫，機艙背風向，導致葉片旋角機構破壞。最後倒塌前訊號中斷無法得知，但就趨勢來看，應與 H01 一樣，轉速飆升後，塔架振動過大而倒塌。
H06	於中塔架與下塔架連結處，倒塌	無法分析	南	N/A	N/A
H11	於中塔架與下塔架連結處，倒塌	無法確認	南	104/08/07 17:06:25 (第一故障起始點)	由於資料過少，大膽推測前一天下午 5 點的故障事件，可能已經造成機艙內部甚至是轉子內部有設備燒毀故障。後續無法得知。
H12	葉片斷裂	轉速飆升	北	104/08/08 12:00:00	葉片位於順槳位置(0 度)，無法回到安全位置(90 度)，08/08 中午起風後，造成轉子轉動起來，轉速過高從葉片處先破壞。
H14	於中塔架與下塔架連結處，倒塌	無法分析	南	N/A	N/A
H18	於中塔架與下塔架連結處，倒塌	轉速飆升	南	104/8/8 04:06:19	大致與 H01 相同，到後期轉向系統一樣跳脫，使機艙背風向。2 號葉片已經無法固定於安全位置，液壓壓力喪失。後續訊號中斷，但基本上與 H01/H04 面臨一樣的威脅，旋角系統仍然處於極大負載的壓力下，可能遲早被破壞而使轉子轉動。

二、機組規格說明

本次台中港區倒塌的機組皆是源自於荷蘭廠商 Zephyros 的設計，型號為 Z72 的直驅式風力機，額定功率為 2 MW，耐受風速達 70 m/s，其餘基本規格如表 2 所示。機組發電量、葉片角度、轉矩、以及轉速對於風速的性能曲線關係，如圖 5 所示。在風速 12.3 m/s 時可達到 2 MW 的額定滿載發電量。而本文以轉向系統與旋角系統做為主要研究項目，因此進行兩個次系統不同風速下穩態負載與受力負載分析，如圖 6、圖 7 所示。穩態響應下，葉片根部最大的負載出現在額定風速 12.3m/s 下的 M_y 方向，數值達到 1850 Nm，此時由於葉片角度為 0 度，直接承受迎面而來的風，因此在這個方向出現最大轉矩是很合理的。X 與 Z 方向則相對的非常小。也因此對應到最大的力量，則為 F_z 方向，有大約 350N 的力量。在轉向軸承的部分，一樣是在額定風速有最高的數值，出現在 M_x 以及 F_x 。風速超過額定之後，由於葉片角度會跟著調整，因此葉片根部所承受的負載不會因為風速繼續增加而變大。

表 2 Z72 風力機基本規格[13]

轉子直徑	70.65 m
轉子轉速	變速型、額定轉速 22.5rpm
額定功率	2.0MW
傳動鏈	直驅式發電機、單軸承
額定風速	12.3 m/s
切入 / 切出 風速	3 / 25 m/s
耐受風速	70 m/s
轉子速度控制	旋角控制
風速等級	II&S (基於 IEC61400-1)
發電機質量	49 噸
轉子質量	36 噸
機艙質量	12 噸

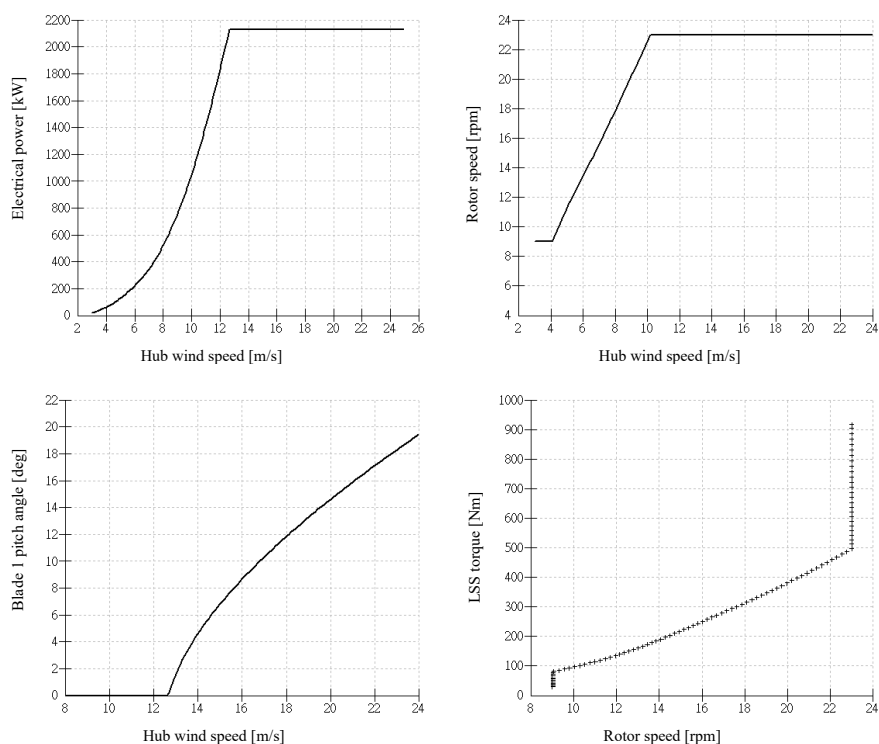


圖 5 風力機組規格(功率曲線、轉速、旋角作動、轉矩)

旋角穩態負載(PITCH Bearing)

- $M_y : > 1800 \text{ kNm}$
- $F_z : > 350 \text{ kN}$

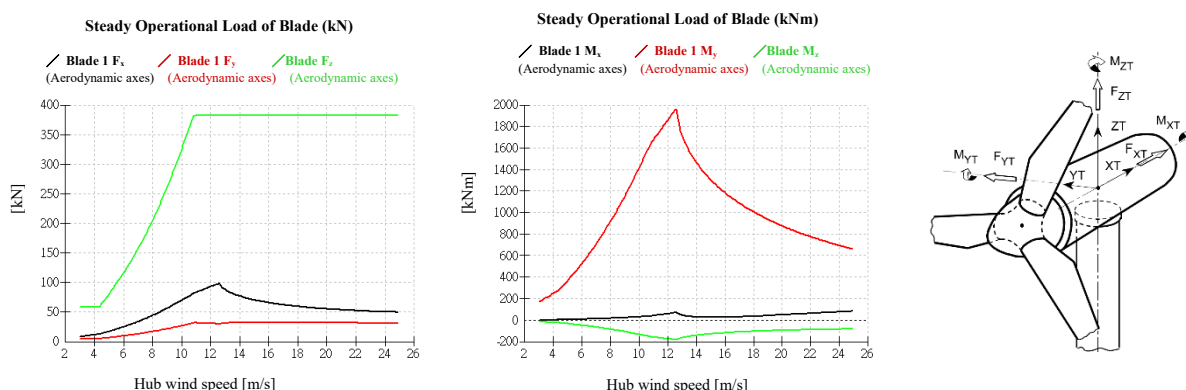


圖 6 葉片根部不同風速下穩態負載與受力

轉向穩態負載(YAW Bearing)

- $M_x : > 850 \text{ kNm}$
- $F_x : > 250 \text{ kN}$

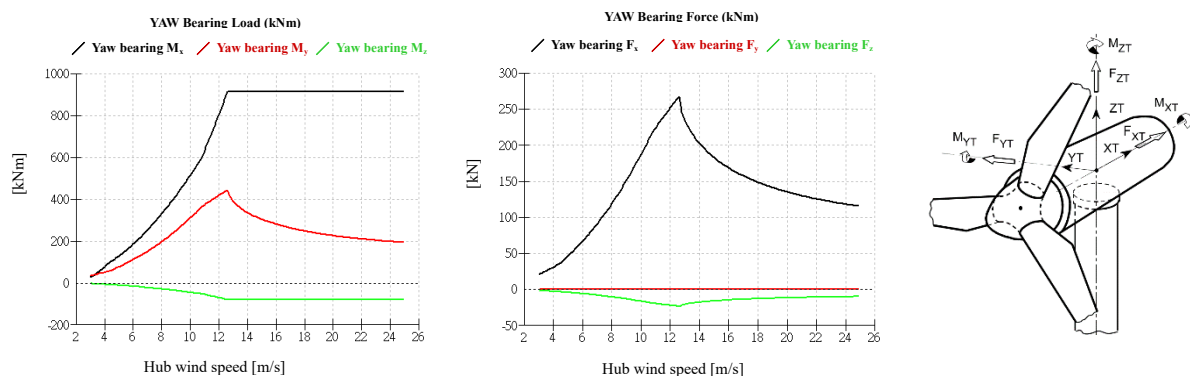


圖 7 轉向系統不同風速下穩態負載與受力

參、極端風況說明

為了能夠反映極端風況對於風力機結構的影響，本章將依據國際標準所制定的各種極端條件設定，以軟體產生相對應的風況，作為本次模擬的輸入，以便呈現風力機實際上可能遭遇的狀況。這些風況包含可能發生的最大平均風速、最大陣風、極限風切、極限風向變化等組合，並且包含可能的擾流變化。

一、輸入風況設定

風況設定，考慮 IEC 目前規範中最極端的狀況，直接以未來新版第四版即將公告的 Class T[14]來進行設定，以模擬出最極端的狀況。其中，EWM (Extreme Wind Model)這個風況設定風速是最高的(如表 3、4 所示)，機組都是處在停機的狀態下，直接考驗結構的耐受度與可靠度。相對的 ETM (Extreme Turbulent Model)則是以較高強度的紊流等級來評估負載。相關設定參數如下：

- Class T 極端風況 EWM :
 1. 參考風速 $V_{ref} = 57 \text{ m/s}$
 2. 50 年一遇極限 $V_{e50} = V_{ref} \times 1.4 = 79.8 \text{ m/s}$
 3. 1 年一遇極限 $V_{e1} = V_{e50} \times 0.8 = 63.84 \text{ m/s}$

- Class A 極端風況 EWM：(對照組)
 1. 參考風速 $V_{ref} = 50$ m/s
 2. 50年一遇極限 $V_{e50} = V_{ref} \times 1.4 = 70$ m/s
 3. 1年一遇極限 $V_{e1} = V_{e50} \times 0.8 = 56$ m/s
- Class T 極端紊流風況 ETM：紊流等級 $A+ = 0.18$
- Class A 極端紊流風況 ETM：紊流等級 $A = 0.16$

表 3 IEC 61400-1 第四版風況等級表[14]

Wind turbine class	I	II	III	S
V_{ave} (m/s)	10	8.5	7.5	Values
V_{ref} (m/s)	50	42.5	37.5	specified by the designer
Tropical(m/s) $V_{ref,T}$	57	57	57	
$A+$ $I_{ref}(-)$		0, 18		
A $I_{ref}(-)$		0, 16		
B $I_{ref}(-)$		0, 14		
C $I_{ref}(-)$		0, 12		

The parameter values apply at hub height and

V_{ave} is the annual average wind speed;

V_{ref} is the reference wind speed average over 10 min;

$V_{ref,T}$ is the reference wind speed average over 10 min applicable for 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; and

I_{ref} is a reference value of the turbulence intensity (see 6.3.2.3)

表 4 機組基本規格與風況設定表

Wing turbine class	T	A
D Rotor diameter	70.65	m
Z_{hub} Hub height of the wind turbine	62.97	m
V_{in} Cut-in wind speed	3	m/s
V_r Rated wind speed	12.3	m/s
V_{out} Cut-out speed	25	m/s
V_{ave} Annual average wind speed at hub height	11.4	m/s
k Shape parameter of the Weibull distribution function	2	--
α Wind shear power law exponent	0.11	--
V_{ref} Hub-height 1-year extreme wind speed(10 min mean)	57	m/s
I_{ref} Characteristic turbulence intensity as function of wind speed	18	%
V_1 Hub-height 1-year extreme wind speed (10min mean)	45.6	m/s
V_{e50} Hub-height 50-year extreme wind speed (3s mean)	79.8	m/s
V_{e1} Hub-height 1-year extreme wind speed (3s mean)	63.84	m/s
Λ_1 Longitudinal turbulence scale parameter	42	m

二、設計工況(Design Load Case)規劃

根據前述 IEC 61400-1 規範中所列的表，扣除疲勞負載(Fatigue Load)的評估，需評估極端負載(Ultimate Load)的 DLCs，包含了 1.1, 1.3~1.5, 2.1~2.3, 3.2~3.3, 4.2, 5.1, 6.1~6.3, 7.1，如

表 55 所示，共計執行超過 700 個工況設計，15 個主要的狀況；初期評估可扣除 3.x、4.x 啟動與停機、5.x 緊急停機、以及 6.3 一年一遇的工況，因此剩下 10 個主要 DLCs 類別。再往下展開考量不同風速下、不同轉向誤差角等參數，有非常多的計算工作要進行。本項工作主要在於分析極端負載與正常負載的差異，因此透過與正常值對照組的比較，也可以理解極端會帶來的變化，參考表 6 所示。

表 5 設計負載工況參數

	DLC 1.1 運轉中 NTM(正常紊流)：對照組	(轉向誤差+/-8 度)
I.	1. $V_{in} < V < V_{out} = 3 \sim 25$ m/s	1.1WINDxx_x
	2. 3 轉向誤差*13 風速	39 cases
	DLC 1.3 運轉中 ETM(極端紊流)：	(誤差+/-8 度)
II.	1. $V_{in} < V < V_{out} = 10.3 \sim 25$ m/s	1.3WINDa_b_c
	2. 3 轉向誤差*13 風速	39 cases
	DLC 1.4 運轉中 ECD(陣風+風向變化)：	(誤差+/-8 度)
III.	1. $V = 10.3, 12.3, 14.3$ m/s	1.4WINDa_b_c_d
	2. 3 轉向誤差*3 風速*4 旋轉角*2 風向變化	72 cases
	DLC 1.5 運轉中 EWS(極端風切)：	(誤差+/-8 度)
IV.	1. $V_{in} < V < V_{out} = 10.3 \sim 25$ m/s	1.5WINDa_b_c_d
	2. 3 轉向誤差*9 風速 *4 旋轉角	108 cases
	DLC 2.1 運轉+故障 NTM(正常紊流)：	
V.	1. $V_{in} < V < V_{out} = 10.3 \sim 25$ m/s	2.1WINDxx_xx
	2. 13 風速+控制系統故障 trip	13 cases
	DLC 2.2 運轉+故障 NTM(正常紊流)：	
VI.	1. $V_{in} < V < V_{out} = 10.3 \sim 25$ m/s	2.2WINDxx_xx
	2. 13 風速*3 種系統旋角故障 trip	39 cases
	DLC 2.3 運轉陣風 EOG(陣風)：	(誤差+/-8 度)
VII.	1. $V = 10.3, 14.3, 25$ m/s	2.3WINDx_x_x
	2. 3 風速*3 誤差*4 停電*4 旋轉角	144 cases
	DLC 6.1 停機/待機中	(50 年一遇極限風況)
VIII.	1. ETW 57 m/s (誤差+/- 8)	6.1a_x
	2. EWM 79.8 m/s (誤差+/- 15)	6.1b_x
	3. 3+風況*3 個誤差*4 旋轉角	15 cases
	DLC 6.2 停機/待機中+停電	(50 年一遇極限風況)
IX.	1. ETM 57 m/s (誤差+/-180 度)	6.2a_x
	2. EWM 79.8 m/s (誤差+/-180 度)	6.2b_x
	3. 12+風況*12 種誤差*4 旋轉角	60 cases
	DLC 7.1：停機+轉向系統故障/旋角故障	(1 年一遇風況)
X.	1. ETM 45.6 m/s (誤差+/-180 度)	7.1a_x
	2. EWM 63.8 m/s (誤差+/-180 度)	7.1b_x
	3. 2 風況*(12 誤差+10 旋角*3 誤差)	196 cases

表 6 IEC 61400-1 設計負載工況表[4]

Design situation	DLC	Wind condition	Other condition	Type of analysis	Partial safety factors
1)power production	1.1	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	For extrapolation of extreme events	U	N
	1.2	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		F	--
	1.3	ETM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		U	N
	1.4	ECD $V_{hub} = V_r - 2m/s, V_r$ $V_r + 2m/s$		U	N
	1.5	EWS $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		U	N
2)power production plus occurrence of fault	2.1	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	Control system fault or loss of electrical network	U	N
	2.2	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	Protection system or preceding internal electrical fault	U	A
	2.3	ECG $V_{hub} = V_r \pm 2m/s$ and V_{out}	External or internal electrical fault including loss of electrical network	U	A
	2.4	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	Control, protection or electrical system fault including loss of electrical network	F	--
3)start up	3.1	NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		U	--
	3.2	ECG $V_{hub} = V_{in}, V_r \pm 2m/s$ and V_{out}		U	N
	3.3	ECG $V_{hub} = V_{in}, V_r \pm 2m/s$ and V_{out}		U	N
4)normal shut down	4.1	NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		F	--
	4.2	ECG $V_{hub} = V_r \pm 2m/s$ and V_{out}		U	N
5)emergency shut down	5.1	NTM $V_{hub} = V_r \pm 2m/s$ and V_{out}		U	N
6)parked(standing still or idling)	6.1	EWM 50-year recurrence period		U	N
	6.2	EWM 50-year recurrence period	Loss of electrical network connection	U	A
	6.3	EWM 1-year recurrence period	Extreme yaw misalignment	U	N
	6.4	NTM $V_{hub} < 0.7 V_{ref}$		F	--
7)parked and fault condition	7.1	EWM 1-year recurrence period		U	A

肆、分析結果

本項目工作以 DNV-GL 公司所開發的 Bladed 軟體為基礎進行負載的分析。此軟體是專門為風力機設計分析開發，尤其是在整機結構負載的計算分析，可以詳細了解不同輸入風況下，各個結構點的受力狀況，進而評估設計是否恰當，加上此軟體的運算結果是通過國際認證單位認可的，具備一定的公信力，因此在全球專業的風力機系統設計廠商中被廣為採用。此軟體透過使用者將風力機各項基本模組的設計規格輸入，包含葉片尺寸、葉片翼形、轉子(rotor, 包含輪轂(hub))、塔架(tower)、傳動鏈(power train, 包含齒輪箱與發電機)、與機艙(nacelle)，把整機的數學模型建立；接著根據性能需求設計控制系統(control)、計算分析結構模態(modal)，便可以根據不同的輸入風況(wind)設計，來測試驗證機組結構在各種運轉模式下，可能承受的負載，進而評估極限負載的發生點以及疲勞破壞。

接著便以本文提及的 Z72 風力機組的規格參數，於 Bladed 軟體中建立模型，再按照前章所設定的風況作為輸入，然後觀察轉向系統包含轉向軸承的負載；並且設定不同風向下，觀察旋角系統負載輸出包含受力、力矩等資訊。與一般風況進行比較，評估極端風況下的負載。風況的設計將以 IEC 61400-1 規範為參考，進行轉向與旋角元件的極限負載的計算評估。

本次研究總共執行表 5 所列總數 725 個設計工況，計算僅以 Class TA ($V_{ref} = 57 m/s$, T.I. = 18%, $V_{ave} = 11.4 m/s$)最高等級的狀況去計算，執行完畢後透過 DNV-GL Bladed 中的統計工具來找出這些 DLCs 中發生極限負載的狀況。

表 7 到 10 即為針對葉片根部(blade root)、輪轂、轉向系統、葉片與軸承(blade & bearing)以及機艙(nacelle)與塔架受力與力矩所製成的表格，對角線黑框對應到的就是該方向力量發生最大值的狀況 DLC。接著將分別針對轉向與旋角兩系統的受力狀況進行說明。

表 7 極限負載-葉片根部(blade root)

Load case			Mx	My	Mxy	Mz	Fx	Fy	Fxy	Fz
			kNm	kNm	kNm	kNm	kN	kN	kN	kN
Mx	Max	7.1b2 15 90 70	4544.9	-189.8	4548.9	-76.3	-13.8	-303.6	303.9	-33.1
Mx	Min	6.2a 270	-4485.0	314.4	4496.0	98.1	26.2	296.3	297.5	-51.2
My	Max	1.4Wind12.3 b -8 0	274.1	4506.3	4514.6	-34.8	256.0	-12.7	256.4	862.4
My	Min	1.4Wind12.3 b -8 0	178.4	-3211.8	3216.8	7.30	-1397.7	-42.4	146.0	823.1
Mxy	Max	7.1b2 15 90 70	4544.9	-189.8	4548.9	-76.3	-13.8	-303.6	303.9	-33.1
Mxy	Min	7.1b2 15 0 80	-0.11	0.18	0.20	-19.2	7.15	2.40	7.54	5.26
Mz	Max	6.2a 330	-2718.0	-102.7	2719.9	12.4	19.7	176.2	177.3	-31.7
Mz	Min	1.3Wind 20.3 8 0	-224.9	1981.0	2989.4	-254.6	198.5	35.1	201.5	1340.1
Fx	Max	1.4Wind12.3 b -8 0	274.1	4506.3	4514.6	-34.8	256.0	-12.7	256.4	862.4
Fx	Min	2.1Wind 22.3	-608.8	-3001.8	3062.9	0.15	-140.3	47.3	148.1	824.0
Fy	Max	6.2a 270	-4485.0	314.4	4496.0	98.1	26.2	296.3	297.5	-51.2
Fy	Min	7.1b2 15 90 70	4544.9	-189.8	4548.9	-76.3	-13.8	-303.6	303.9	-33.1
Fxy	Max	7.1b2 15 90 70	4544.9	-189.8	4848.9	-76.3	-13.8	-303.6	303.9	-33.1
Fxy	Min	7.1b2 120 15	291.8	436.6	295.1	-33.5	0.088	0.010	0.089	-18.9
Fz	Max	1.3Wind 20.3 8 0	118.7	2947.9	2950.3	-225.3	194.6	-0.86	194.6	1428.1
Fz	Min	6.1a -8	-1360.4	50.4	1361.3	-16.3	13.2	105.1	105.9	-58.4

表 8 極限負載-輪殼(Hub)

Load case			Mx	My	Mz	Myz	Fx	Fy	Fz	Fyz
			kNm	kNm	kNm	kNm	kN	kN	kN	kN
Mx	Max	2.1Wind 20.3	885.1	-118.1	323.9	344.8	413.8	349.1	-18.0	349.6
Mx	Min	7.1b2 0 0 70	-64.7	438.0	-43.0	440.1	41.7	0.33	-8.09	8.10
My	Max	2.2Wind 12.3seize	-8.91	5066.7	-459	5083.7	-40.4	-308.4	-211.0	373.7
My	Min	2.2Wind 10.3feather	540.2	-3970.8	-123.3	3972.7	75.6	-192.9	-277.5	337.9
Mz	Max	1.3Wind 24.3 8 30	-10.8	765.9	3100.6	3193.8	-122.9	274.2	49.1	278.5
Mz	Min	2.1Wind 22.3	-5.19	195.5	-2565.6	2573.1	-122.0	-302.7	139.5	333.3
Myz	Max	2.2Wind 12.3seize	-891	5066.7	-415.9	5083.7	-40.4	-308.4	-211.0	373.7
Myz	Min	1.3Wind 25 -8 0	-2.87	-0.15	0.085	0.17	1.6	236.7	-242.2	338.7
Fx	Max	1.4Wind12.3 b -8 0	31.3	611.9	614.0	866.9	651.7	-41.0	-353.8	356.1
Fx	Min	2.3Wind14.3 0 -8 90	-19.1	344.9	-622.8	711.9	-387.1	226.7	-261.5	346.1
Fy	Max	7.1a2 270 15	-4.35	469.9	114.3	483.6	21.8	567.4	-45.5	569.2
Fy	Min	7.1a2 0 50	-10.6	2000.2	398.0	2039.4	146.8	-660.3	-129.0	672.8
Fz	Max	6.2a 60	0.78	509.0	341.2	612.8	48.5	53.7	520.6	523.3
Fz	Min	6.2a 330	-2.19	198.7	-598.2	630.3	9.61	-7=83.0	-523.0	529.6
Fyz	Max	7.1a 0 50	-10.6	2000.2	398.0	2039.4	146.8	-660.3	-129.0	672.8
Fyz	Min	6.1a -8	-2.10	444.2	-69.5	449.6	47.0	5.67	-5.39	7.82

表 9 極限負載-轉向系統(Yaw system)

Load case			Mx	My	Mxy	Mz	Fx	Fy	Fxy	Fz
			kNm	kNm	kNm	kNm	kN	kN	kN	kN
Mx	Max	6.2a 90	1193.3	-2727.8	2977.4	1974.3	-1.07	-601.9	601.9	-941.9
Mx	Min	6.2a 270	-1254.5	-1863.2	2246.1	-2065.7	8.42	631.5	631.5	-945.0
My	Max	1.3Wind 24.3 8 30	64.5	790.6	793.3	309.7	8.96	-56.0	56.7	-955.7
My	Min	7.1a2 0 10	-82.3	-5331.4	5332.0	132.1	257.6	53.7	263.1	-819.9
Mxy	Max	7.1a2 0 10	-82.3	-5331.4	5332.0	132.1	257.6	53.7	263.1	-819.9
Mxy	Min	6.1a 0	-9.31	-12.6	15.7	749.2	66.9	50.0	83.5	-567.4
Mz	Max	7.1a 8 0	576.4	-1249.4	1376.0	3471.8	158.0	-163.8	227.6	-1013.7
Mz	Min	7.1a 8 40	-486.4	-1065.7	1171.5	-3659.1	318.4	103.6	334.8	-754.0
Fx	Max	1.4Wind12.3 b -8 0	200	-709.5	709.7	298.8	668.7	3.73	668.7	-1054.6
Fx	Min	2.3Wind14.3 0 -8 90	-49.8	-3321.3	3321.7	-544.6	-473.0	1.18	473.0	-986.4
Fy	Max	6.2a 270	-1254.2	-1771.7	2170.7	-2077.7	-0.78	631.7	631.7	-929.6
Fy	Min	6.2a 90	1193.3	-2727.8	2977.4	1974.3	-1.07	-601.9	601.9	-941.9
Fxy	Max	1.4Wind12.3 b -8 0	20.0	-709.5	709.7	298.8	668.7	3.73	668.7	-1054.6
Fxy	Min	1.3Wind 4.3 0 0	3.33	-2601.9	2601.9	38.7	-0.003	0.013	0.013	-1021.6
Fz	Max	6.1a 0	519.2	121.6	533.3	2179.9	75.9	-198.2	212.3	-511.2
Fz	Min	7.1a 0 50	445.7	-3436.4	3465.2	2445.4	134.7	-144.5	197.5	-1350.1

表 10 極限負載-葉片與軸承(Blade & Pitch)

Load case		Pitch bearing 1 applied pitch moment	Blade 1 Mx (principal axes), Distance along blade=0m	Blade 1 My (principal axes), Distance along blade=0m	Blade 1 Mxy (principal axes), Distance along blade=0m	Blade 1 Mz (principal axes), Distance along blade=0m	
		kNm	kNm	kNm	kNm	kNm	
Pitch bearing 1 applied pitch moment	Max	6.2b_150_90	201.2	-565.5	3241.9	3290.9	-397.1
Pitch bearing 1 applied pitch moment	Min	6.2a_330	-132.4	643.0	-2630.0	3707.5	91.2
Blade 1 Mx (principal axes), Distance along blade=0m	Max	1.4Wind12.3_b_-8_0	-8.65	2125.0	-2350.4	3168.6	150.3
Blade 1 Mx (principal axes), Distance along blade=0m	Min	1.4Wind12.3_b_0_0	16.1	-1709.1	3169.1	3600.5	-207.0
Blade 1 My (principal axes), Distance along blade=0m	Max	7.1b2_15_90_70	76.3	858.8	4454.4	4536.4	-345.4
Blade 1 My (principal axes), Distance along blade=0m	Min	6.2a_270	-98.1	586.8	-4443.6	4482.1	366.4
Blade 1 Mxy (principal axes), Distance along blade=0m	Max	7.1b2_15_90_70	76.3	858.8	4454.4	4536.4	-345.4
Blade 1 Mxy (principal axes), Distance along blade=0m	Min	1.4Wind12.3_b_-8_0	2.57	0.14	0.066	0.15	-2.58
Blade 1 Mz (principal axes), Distance along blade=0m	Max	6.2a_270	-98.1	586.8	-4443.6	4482.1	366.4
Blade 1 Mz (principal axes), Distance along blade=0m	Min	6.2a_120	173.7	-367.2	4022.4	4039.1	-416.7

表 11 極限負載-機艙(Nacelle)與塔架(Tower)

Load case		Nacelle fore-aft displacement	Nacelle side-side displacement	Tower Mx, Tower station height=0m	Tower My, Tower station height=0m	Tower Mxy, Tower station height=0m	Tower Mz, Tower station height=0m	Tower Mx, Tower station height=62.97m	Tower My, Tower station height=62.97m	Tower Mxy, Tower station height=62.97m	Tower Mz, Tower station height=62.97m	
		m	m	kNm	kNm	kNm	kNm	kN	kN	kN	kN	
Nacelle fore-aft displacement	Max	1.4Wind12.3_b_-8_0	0.70	0.005	-345.6	43319	43320	263.8	643.2	1.79	643.2	-1065.8
Nacelle fore-aft displacement	Min	2.2Wind_12.3 seize	-0.70	0.25	-15259	-38013	40961	-1880.1	-446.0	205.4	491.0	-1024.2
Nacelle side-side displacement	Max	6.2a_270	-0.052	0.83	-52296	-920.7	52304	-2069.3	11.1	607.3	607.4	-960.7
Nacelle side-side displacement	Min	6.2a_90	-0.097	-0.79	49315	-3653.9	49450	1854.2	0.63	-571.4	571.4	-946.3
Tower Mx, Tower station height=0m	Max	6.2a_90	-0.097	-0.79	49315	-3653.9	45450	1584.2	0.63	-571.4	571.4	-946.3
Tower Mx, Tower station height=0m	Min	6.2a_270	-0.056	0.83	-52335	-1300.2	52351	-2078.7	7.91	607.7	607.8	-948.9
Tower My, Tower station height=0m	Max	1.4Wind12.3_b_-8_0	0.70	0.005	-345.6	13319	43320	263.8	643.2	1.79	643.2	-1065.8
Tower My, Tower station height=0m	Min	2.2Wind_12.3 seize	-0.70	.024	-14903	-38059	40873	-1905.4	-476.7	200.1	489.5	-1026.8
Tower Mxy, Tower station height=0m	Max	6.2a_270	-0.056	0.83	-52335	-1300.2	52351	-2078.7	7.91	607.7	607.8	-948.9
Tower Mxy, Tower station height=0m	Min	1.1Wind_3_0_60	-0.036	-0.001	0.96	-1.40	1.70	143.5	39.2	0.24	39.2	-1023.4
Tower Mz, Tower station height=0m	Max	2.2Wind_12.3 seize	0.095	-0.044	2979.0	9691.8	10139	4714.2	147.8	-36.5	152.3	-1048.2
Tower Mz, Tower station height=0m	Min	2.2Wind_12.3 seize	-0.62	0.10	-6755.6	-34984	35630	-5022.7	-430.4	88.2	439.3	-976.9
Tower Mx, Tower station height=62.97m	Max	1.4Wind12.3_b_-8_0	0.70	0.007	-493.8	43102	43105	298.2	646.7	3.53	646.7	-1068.2
Tower Mx, Tower station height=62.97m	Max	2.2Wind_12.3 seize	-0.67	0.15	-9146.4	-37397	38500	-4354.4	-477.7	115.9	491.6	-996.5
Tower My, Tower station height=62.97m	Min	6.2a_270	-0.061	0.82	-51291	-1584.9	52216	-2081.6	2.09	608.1	608.1	-945.2
Tower My, Tower station height=62.97m	Min	6.2a_90	-0.092	-0.78	49507	-3263.0	49165	1972.8	3.30	-579.1	579.1	-956.0
Tower Mxy, Tower station height=62.97m	Min	1.4Wind12.3_b_-8_0	0.70	0.007	-193.8	43102	43105	298.2	646.7	3.53	646.7	-1068.2
Tower Mxy, Tower station height=62.97m	Min	1.1Wind_22.3_-8_90	-0.071	-0.002	48.8	-1806.7	1807.4	69.7	0.000	-0.011	0.011	-987.5
Tower Mz, Tower station height=62.97m	Max	6.1a_0	0.21	-0.24	15010	15835	21818	21777	73.0	-194.4	207.6	-513.1
Tower Mz, Tower station height=62.97m	Min	7.1a_0_50	0.13	-0.19	9626.1	12598	15855	2445.1	133.0	-136.3	190.4	-1351.1

一、轉向系統

轉向系統是為了隨時能夠正對風的來向，使風力機得到最好的發電效率。大型風力機分為上風型(upwind)與下風型(downwind)的設計，其實也反映了此機組的設計概念，例如日本過去就曾經提出下風型的作法，讓機組在颱風的時候使轉子背對風向[15]。德國知名的風力機製造商 Enercon 亦曾經提出專利，規劃風力機在極端的氣候風況下，轉向系統與葉片的因應策略，以降低結構所承受的負載[16]。這些研究說明了在極端風況下，葉輪轉子面所在的方向其實對結構負載有很大的影響，因此本研究亦特別針對轉向系統的極限負載進行評估。圖 8 與 9 即比較了正常運轉下與極端條件下，對於轉向軸承所產生負載等級的差異。在實驗結果 DLC 7.1a 8_40 中，極端紊流風況(ETM, extreme turbulent model, 風速 45.6 m/s, 基於一年發生一次的機率設計)下,其中一根葉片故障鎖死在 40 度、轉向誤差 8 度的情況發生極限負載。 M_z 方向的轉矩負載值超過 3500 kNm, 相較於 DLC 1.1 正常強風運轉下約 1000 kNm (圖 9), 相差很多。再從轉速的變化也可發現此負載的影響。從圖的轉速圖來觀察, 這個風況下, 風力機原本就是在強風下 (>25m/s) 的安全保護停機模式, 因此 7.1a 的模擬曲線轉速接近於 0。但在 35 秒附近, 發生葉片故障, 也導致轉速無法透過葉片有效控制, 使得轉速往上增加到約 8rpm; 而葉輪轉子(Rotor)一旦加速轉動, 葉片因此承受更大的風力效應, 進而對整個輪轂(Hub)產生更大的負載, 也導致 M_z 方向轉矩快速飆升到 2200 kNm。接著大約再轉一圈之後(平均轉速約 4rpm, 一圈約 15 秒), 在時間 50 秒處, 等於是大概同樣的位置, 發生了前述 3500 kNm(反向)的極端值。由此可知, 強風下發生故障時, 對於結構的影響甚鉅, 除了極高的負載可能造成立即性的結構破壞之外, 累積的疲勞破壞也不可忽視。反觀正常運轉下的風況 DLC1.1, 18.3m/s 的風速使之維持在滿載發電、滿載運轉(約 22.5rpm)的狀態, 即使在時間點 18 秒時, 由於紊流風速的變化, 使得系統發生過轉速(>26rpm)的緊急事件, 系統緊急停機(轉速降低至 0), 在事件發生的時間點, 其最大負載 1000 kNm 雖然也不小, 但與 DLC 7.1a 的 3500 kNm 相比, 威脅性就小很多。從這個結果來看, 可以發現極端條件下, 若旋角系統發生故障, 也間接對轉向系統造成更嚴重的負擔。也就是說, 很可能是連鎖性的反應。某個旋角馬達發生故障, 引發跳機, 但最大負載是出現在轉向軸承。這時候反應的元件就是轉向馬達上。可能因為此過大的扭矩, 將馬達燒壞甚至直接從機構件破壞。

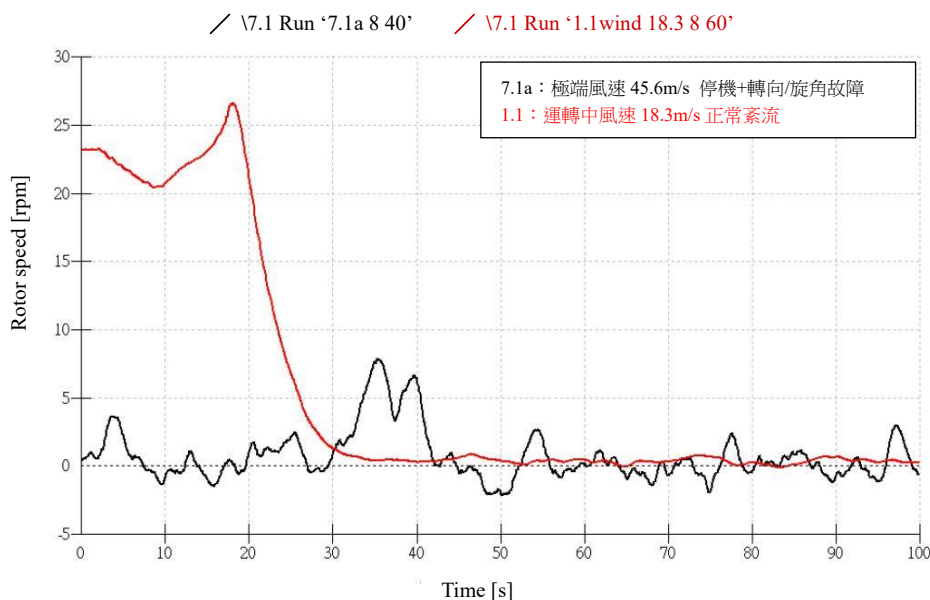


圖 8 發生轉向軸承極限負載的 DLCs 比較-轉速

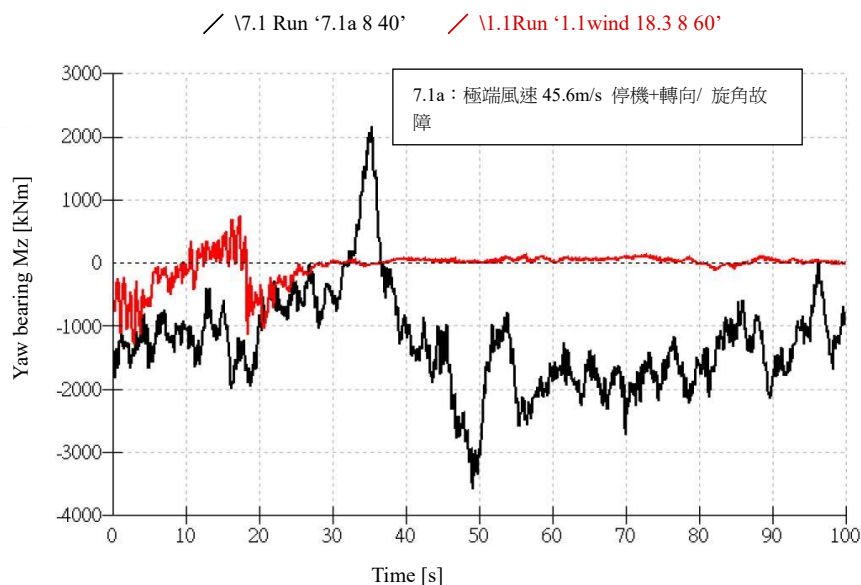


圖 9 發生轉向軸承極限負載的 DLCs 比較-M_z

二、葉片與旋角系統

(一) 葉片所承受的負載

葉片所承受的負載，圖 10 是三個較為極端的 DLC 1.4、6.2 以及 7.1b 與正常運轉 DLC 1.1 的轉矩比較。相較於正常運轉的狀態，極端狀況的轉矩差異都非常大。葉片極限負載在三個極端工况下會出現約超過 4500 kNm 的力矩(M_y)，正常運轉下最高僅約 1000 kNm，再與第二章穩態模擬下的 1800 kNm(參考圖 6)有近三倍的動態瞬時負載發生。其中，最大的極限負載是發生在 DLC 7.1b2_15_90_70，意思是待機狀態下，輸入極端風速 63.8 m/s，轉向誤差角 15 度、旋轉角 90 度、一號葉片故障並且卡在 70 度的狀態下所產生的負載。這個案例與前述轉向系統發生極端負載的情況非常類似，亦即同樣是停機狀態下、強風吹拂、加上旋角系統故障，導致極端負載的發生。而且這個工况的條件更為嚴苛，風速設計雖然相對平穩(無紊流)但由 45.6 m/s 提升到 63.8 m/s，轉向誤差達 15 度是前述轉向極端案例 8 度的兩倍多。再從圖 11 的轉速變化來看，由於此風速設計是無紊流的固定極端風速，因此呈現了一個非常穩定週期性的

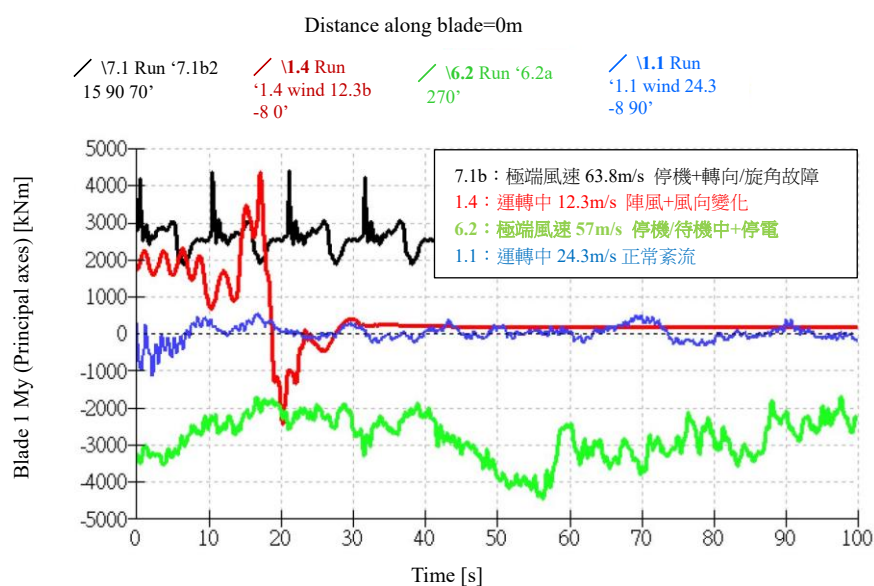


圖 10 葉片極限負載的 DLCs-葉片負載 M_y

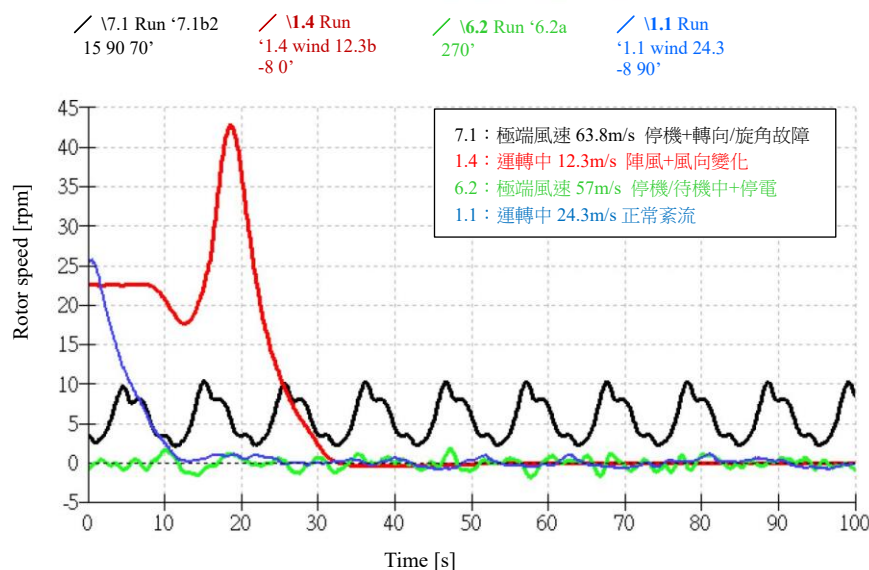
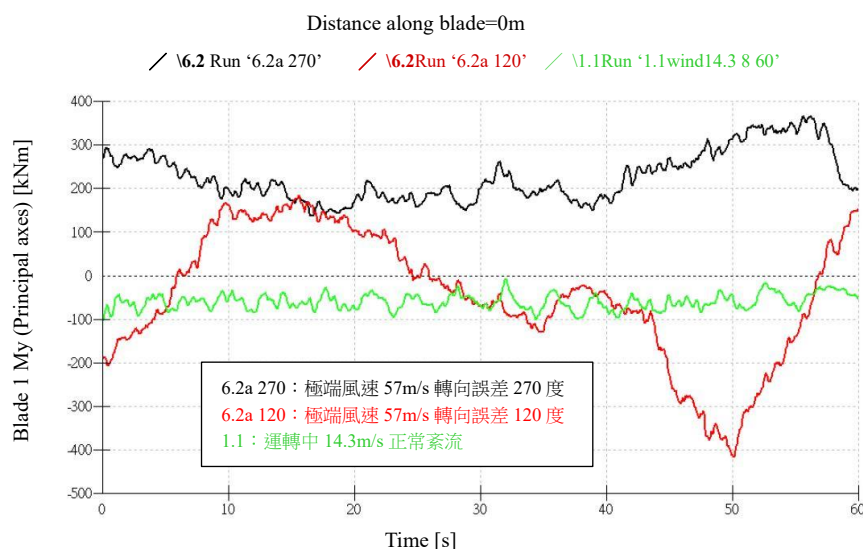


圖 11 葉片極限負載的 DLCs 轉速

負載與轉速的變化。再來觀察 DLC 1.4 的轉速變化，可發現 DLC 1.4 的陣風變化會導致轉速瞬間上升到 43rpm，明顯超過設定(>26 rpm)，以致於啟動了安全停機模式，必須讓轉速透過葉片的控制快速下降。極限負載也是出現在那個陣風發生點。其中一個很接近的狀態是 DLC 1.4Wind12.3_b_-8_0，意思是極限陣風變化(增加 15 m/s)加上風向變化(瞬變 58.5 度)，同時發生風向與風速的劇烈變化，當然對葉片帶來很大的負載，雖然轉速得到控制後，負載也因此得到控制，但事件發生時的瞬間極限負載卻很有可能對系統造成不可逆的影響，這個現象其實也頗符合颱風下可能會出現的風況，必須非常小心。DLC 6.2a_270 則是平均風速 57 m/s 下，轉向誤差 270 度(從左側吹過來)，加上極限紊流變化的狀況。一樣會對葉片造成 4485 kNm 的力矩，這一樣可能是颱風下可能因為風向快速變化後，轉向系統還沒來得及反應修正誤差下，所產生的負載。以上落在 4500 kNm 範圍的轉矩，都非常有可能導致葉片會因此直接斷裂破壞。

(二) 旋角系統須提供多少制動力

由本文提及的風力機倒塌事故原因，以及前述模擬案例得知，葉片在某些風況下將承受非常大的負載，因此若葉片旋角系統無法承受，將導致嚴重的破壞。Z72 風力機的葉片旋角系統提供了兩個保護機制，一個是靠旋角驅動馬達本身制車的一個制動力，另外則是本機組所另外設計的一個額外保護硬體固定插銷(lock pin)，位於葉片旋轉機構中，可在風力機停機下，將葉片旋角位置固定住。若要判斷馬達與固定銷的制動力，則須觀察 M_z 方向施加在葉片軸承上的轉矩。從統計表格(表 10)可查得，這個會發生在 DLC 6.2a 的狀況，數值大約落在 400 kNm，也是前面討論 M_y 出現過的極端狀況之一。同時對於 M_z 也有非常高的轉矩，因此直接影響到旋角系統是否能夠承受。如果將此 400 kNm 與葉片軸承、旋角馬達齒輪比考量後，整個齒輪比為 2380，轉換計算後可發現作用在馬達端的轉矩為 400 kNm/2380，約 168 Nm。反觀 DLC 1.1 正常運轉滿載發電狀態下， M_z 轉矩平均約 50 kNm，換算成馬達端轉矩僅約 22 Nm。單從此數據來看，Z72 改良後的旋角馬達僅有 32 Nm，對於滿載運轉下已足夠，但對於極端風況下顯然是不夠。表示另一額外的固定插銷就必須提供至少 136 Nm 左右的承載力才有辦法抵擋如此極端的風況。當然這部份只是模擬計算的結果，模型的準確度、軟體的模擬誤差，實際狀況，還有待後續的驗證。圖 82 為 DLC 6.2 與 DLC 1.1 正常運轉(強風)狀態下的 M_z 負載比較。正常狀態下， M_z 都可維持在正常範圍內。

圖 82 發生葉片極限負載的 DLCs 比較-M_z

伍、結論

由本研究的探討與分析可知，葉片旋角與機艙轉向這兩個次系統在颱風時，是最重要的兩個次系統，決定了整個結構是否能夠順利在極端風況下存活。由於台灣現有安裝的機組，其轉向系統與旋角系統的動作策略並沒有針對颱風來因應設計；可能有原本 Class II 風況等級的設計碰到 Class I/T 的風況，轉向系統與旋角系統結構耐受力不足，使得機組出現過載跳脫的機率大幅提升。系統發生這類異常時，轉向系統的安全開關會自動跳脫，必須等維修人員上機後，才能將開關復歸。在颱風的情況下，考量人員安全，不會讓維修人員去現場將開關復歸，進而導致機組處於很危險的狀態下，最後導致嚴重的破壞與倒塌。因此如果沒有將此系統改良或尋找新的方案，機組就仍然暴露在一個高風險之下。以下將針對本次的負載分析與操作策略建議進行總結說明。

一、負載分析

(一) 轉向系統

從負載分析的結果可發現，轉向系統在極端陣風，某根葉片故障鎖死的情況下，發生了極限負載，且相較於正常強風下運轉的情況，負載高出了 3.5 倍之多，可見其對於結構的影響甚鉅，累積的疲勞破壞也不可忽視。從這個結果來看，可以發現極端條件下，若旋角系統發生故障，也間接對轉向系統造成更嚴重的負擔。也就是說，很可能是連鎖性的反應。

(二) 旋角系統

本次分析發現葉片結構在許多設計情況下都發生與正常情況差異非常大的負載，大約是 4.5 倍，包含了前述的 DLC 1.4(極限陣風+風向變化)、6.2(轉向誤差+極端風況紊流)以及 7.1b(待機+極端風速+葉片故障)，都出現非常極端的負載。這些事件雖然平常發生機率都很低，但在颱風侵襲期間卻是機率非常高的狀況。作為面對極端風力的第一道防線，葉片的保護機制就非常重要。就目前的分析結果，葉片的固定插銷需提供至少 136 Nm 左右的承載力才有辦法抵擋如此極端的風況。當然這部份只是模擬計算的結果，模型的準確度、軟體的模擬誤差，實際狀況，還有待後續的驗證。

(三) 改善方案

根據分析結果，可能的改善方案有以下幾種：

1. 將實體開關淘汰，使用電腦控制，這樣在颱風的情況下，維修人員在不能到場的狀況下，仍然能夠使開關復歸，減少機組背面迎風的機會，也避免維修人員的傷亡。
2. 仍然使用實體開關，但必須增加一個由電腦控制能使實體開關復歸的裝置。這樣在颱風的情況下也能

使跳脫的安全開關復歸。

3. 新增或改寫系統，在一般情況下原本所輸入的參數並沒有問題，但在特殊情況下，系統的跳脫是導致倒塌的主因，因此將參數改變，讓系統能夠在特殊的情況下有正確的判讀，減少安全開關的跳脫機率。不過這個方式必須能夠有原廠設計的控制程式原始碼，甚或是全部重新撰寫，這在實務面上有其困難之處。

二、操作策略

除了這些改善外，同時間也應從控制程式下手。設計相對應的控制器，以便能夠以最有利的方式來面對極端風況，先從操作面讓負載能夠卸掉之後，再由硬體的保護措施來做最後防線，降低發生狀況的機率，提出以下兩點自保策略。

(一) 斷尾求生

由於葉片結構的破壞，將導致後續整部機組的倒塌風險，從風險管控的角度來看，損失葉片與損失整部機組的成本相差非常大。葉片損失可以短時間內裝上新的。但整部機組倒塌就沒有機會再回復運轉了。因此，未來機組的設計，或可考量設計葉片在某個臨界點先行被動的斷裂或是主動地破壞/脫離，避免等到轉速或結構振動過大，導致整組機組倒塌破壞。

(二) 旋角與轉向的設計

由於強風向的倒塌多是由於葉片失控後，轉速增加導致轉速飆高後，結構的破壞。因此如果能夠從旋角與轉向的機構面進行研究，設計其在電器控制系統失效下，還能夠被動的移動到安全位置，這樣就可大幅降低機組的風險。

在未來的研究上，本團隊目前已經在實際風場機組上安裝感測器，測量實際強風下的振動與負載。未來將可與本次研究結果進行比對，驗證不同的操控策略是否可有效降低結構負載。

參考文獻

- [1] 交通部中央氣象局(2018/5/20)。颱風。取自：https://www.cwb.gov.tw/V7/climate/climate_info/taiwan_climate/taiwan_5/taiwan_5_2.html。
- [2] 張志新、王俞婷、傅鏗漩、林又青、張駿暉、劉哲欣、呂喬茵、吳啟瑞與蘇元風(2015)。**2015年蘇迪勒颱風災害調查彙整報告**。國家災害防救科技中心之研究成果報告，未出版。
- [3] KITAMOTO Asanobu - National Institute of Informatics (NII) (n.d.). Digital typhoon: Typhoon images and information. Retrieved from: <http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/> (2015/10/06)。
- [4] IEC(International Electrotechnical Commission). (2010). *IEC 61400-1-am1 ed3.0, Amendment 1 - Wind turbines - Part 1: Design requirements*. Switzerland: International standard of IEC publication.
- [5] 交通部中央氣象局 (n.d.)。颱風資料庫。取自：<http://rdc28.cwb.gov.tw/TDB/ntdb/pageControl/windsearch> (2018/5/20)。
- [6] S.Tanigaki. (2011/12/7-8). *Applicability of the NTM model to Japanese wind climate*. 1st meeting of IEC TC88/MT1, Roskilde, Denmark.
- [7] T. Kogaki. (2011/12/7-8). *Background and overview of proposal from Japanese national committee*. 1st meeting of IEC TC88/MT1, Roskilde, Denmark.
- [8] H. Imamura. (2012/3/8-9). *Evaluation of wind turbine load by a new wind turbine class and a turbulence category*. 2nd Meeting of IEC/TC88/MT1, Berlin, Germany.
- [9] T. Ishihara and A. Yamaguchi. (2012/6). *Uncertainty of the estimated extreme wind speed by using the Monte*

Carlo simulation of tropical cyclone. 3rd meeting of IEC TC88/MT1, Boulder, CO, USA.

- [10] H. Imamura. (2012/6). *Discussion of a new wind turbine class for tropical cyclone prone region*. 3rd meeting of IEC TC88/MT1, Boulder, CO, USA.
- [11] J. H. Liu. (2012/6). *Wind condition assessment in Taiwan*. 3rd meeting of IEC TC88/MT1, Boulder, CO, USA.
- [12] H. Imamura. (2013/1/11-13). *Tropical conditions*. 5th meeting of IEC TC88/MT1, Geneva, Swiss.
- [13] C. Moerman. (2009). Harakosan technical documentation, user's guide (HE-0378-R03). Tokyo, Japan: Harakosan Co.
- [14] IEC(International Electrotechnical Commission). (2019). *IEC 61400-1 ed4.0, - Wind energy generation systems - Part 1: Design requirements*. Switzerland: International standard of IEC publication.
- [15] HITACHI (2018). ダウンウインド式風力発電。Retrieved from: <http://www.hitachi.co.jp/products/power/wind-turbine/feature/rotor/> (2018/5/20)。
- [16] A. Wobben. (2002). Azimuthal control of a wind-energy turbine during a storm, WO/2002/042641.