

風力機結構負載與共振模態之分析

Load and modal analysis of the wind turbine system

劉瑞弘

工業技術研究院 機械與系統所
風力發電設備技術部

摘要

風力發電機在設計過程中，除了各個元件的設計製造都必須符合規格之外；還必須考慮系統在各種操作狀態下可能承受的負載，以確保正式運行發電時，能夠因應不同的環境變化而安全運轉並存活。本文針對風力機系統所承受的負載與其特性進行介紹，並透過認證規範中的設計需求以及負載模式說明負載與振動模態分析的重要性。

關鍵字：風力發電機、負載分析、模態分析

Abstract

A wind turbine must consider various load condition and related modal resonance so it can operate in a safe manner and induce no resonance response. This article presents the load and modal analysis to the wind turbine system. And according to the design requirement and load condition in the international certification rule, the importance of the load analysis is introduced.

Keywords: Wind turbine, load analysis, modal analysis

1. 前言

現代的大型風力發電系統一般由葉片(Blades)、增速齒輪箱(Gearbox)、發電機(Generator)、輪轂(Hub)、機艙(Nacelle)、塔架(Tower)等等關鍵元件所組成。因此，風力機在實際運轉時，上述機組內的各個組件會因為不同的輸入，也就是風況，相互影響，進而產生不同的負載響應。也由於氣候變化莫測，使得風力系統的輸入端極不穩定，而輸出端的電力則必須保持非常穩定，以得到好的電網電力品質。簡而言之，就是必須將不穩定之風能轉變成為穩定的電力輸出。理想上當然可以透過控制手段達到這個單一目標，但是如果還要考慮系統的安全，維持負載的穩定，那就必須考慮很多的因素才能完成一個好的設計。

為了得到能量，風力機系統結構同時必須承受各式各樣的負載，所以風力機設計不能單只考慮擷取、獲得、輸出最大的能量，還要讓系統可以達成規範所要求[1]，至少 20 年以上的壽命，並且符合經濟效益，盡可能使發電成本合理。因此風力機設計過程中必須先模擬各種狀況，進行各種不同狀態下的受力分析，以符合國際認證規範(IEC-61400)中的基本要求。

除了分析結構是否能夠承受各種負載之外，由於風

力機運轉時，葉輪轉子持續的旋轉，依轉速的不同就會有不同的頻率，形成許多周期性的負載，因此會與結構中的每個元件互相影響。如果頻率有重疊，就可能引起共振的效應，對於系統就會產生很嚴重的破壞。

本文以 2MW 級的風力發電系統為對象，針對風力機所可能產生的負載與結構模態間的關係，進行模擬計算與分析，以便找出系統中發生共振的頻率。再根據此數據，進行控制器設計時的依據，使系統在運轉時可以順利避開共振頻率，正常運轉。

2. 風力機所承受的負載

由於風力機所承受的外界環境變化非常大，各種負載同時施加在系統上，形成非常複雜的狀態，如同圖 1a[2]所示，有重力、離心力、氣動力等，造成了如 1b[2]所示葉片的變形、塔架的彎曲、扭曲等。根據這些負載來源，可以將其分類為靜態、穩態、週期、暫態、脈衝、隨機、以及共振等等負載類型，然後可以算出結構的極限強度、疲勞負載、以及共振資訊，如圖 2 所示。

而從各種旋轉機械所承受的週期性負載以及負載的不規則性觀察。圖 3 指出了在常見的機械或結構上，承受負載的等級差異性[2]。一般使用的腳踏車在被使用的生命期間內，旋轉週期數最少，負載的變化也最小最規則。依次是飛機、直昇機以及橋樑；最後，也是最不規則的，是風力發電機。在設計 20 年的生命週期內，經常性的保持旋轉運動，因此週期數是最多的，承受上述提及的各種負載，最不規則。

所以，在系統的設計上，就必須更詳加考慮各負載之間的互相影響。如同橋樑一樣，如有不慎，可能就會發生像是 1940 發生在美國著名的 tacoma 橋樑斷裂的事件。該橋樑的結構自然頻率因為與外部風的頻率產生共振，導致劇烈的上下振動，造成橋樑快速在短時間內就損壞[3]。風力機系統更必須重視此設計項目，以免造成無法挽救的結果。

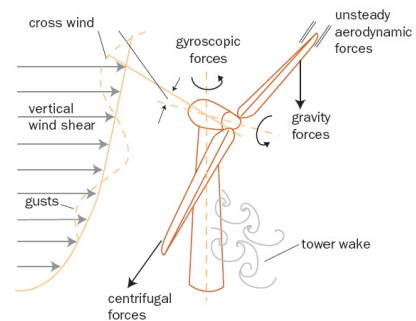


圖 1a 風力機所承受負載[2]

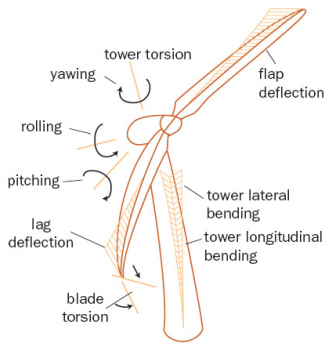


圖1b 風力機所承受負載[2]

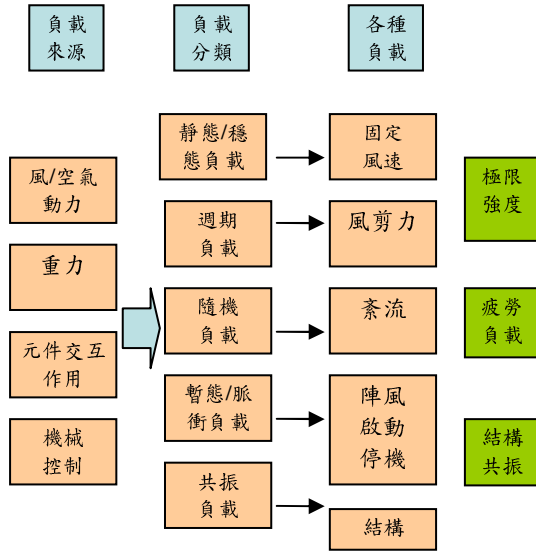


圖2 風力機負載分類

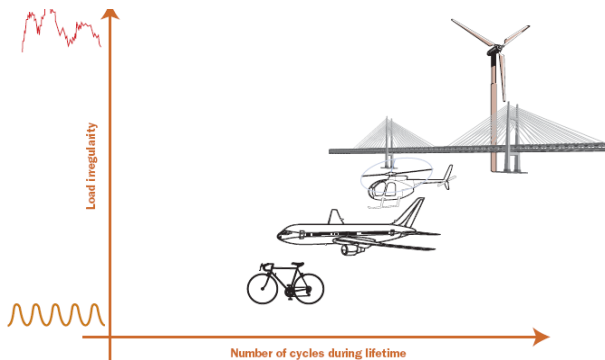


圖3 不同旋轉機械生命週期所承受的負載等級[2]

3. 風力機負載分析

目前風力機認證規範中，對於系統可承受負載的要求都有明確規劃，在 IEC-61400[1]的規範中可以看到。如下表 1 所列為 IEC 規範中的各種設計負載條件(Design Load Case, DLC)，列出了進行認證所需要做的測試項目。基本上，這些 DLC 是各種操作狀況與外部輸入條件的組合，然後根據不同的風況，進行極限負載或是疲勞負載的分析，並考慮安全係數。

以表 1 中的第 1 個設計狀況來說，發電狀態(Power production)，表示在正常運轉發電的狀態下，必須以 1.1 到 1.5 的幾種不同風況(NTM 正常紊流模型、ETM 極限

紊流模型、ECD 極限陣風與風向改變、EWS 極限風切)，配合外部條件，進行 U 極限負載或是 F 疲勞負載的分析。根據這樣的條件進行計算，得到系統中所有元件的負載狀態。如下圖 4 即為塔架的負載。

再將其他所有的設計狀況完成後，就可以做出如圖 5 的負載分布圖，然後從中找出塔架的極限負載出現在那一個操作條件下。以圖 5 的例子來說，塔架的於 x 方向的力量，極限負載出現在 6.1 的測試項目中，也就是系統停機/怠轉時，面對一個極限風速模型(EWM)所會承受的負載。以同樣的方式，也可以找出其他元件的極限負載以及疲勞負載會出現在那個操作條件下。如果發現到結構負載過高，就可以進行設計的修正。

表1 風力機認證規範之負載設計條件[1]

Design situation	DLC	Wind condition	Other conditions	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 $V_{hub} = V_r = 2 \text{ m/s}, V_r$		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	EOG $V_{hub} = V_r \pm 2 \text{ m/s}$ 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 faults including loss of electrical network	F	*
3) Start up	3.1	NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		F	*
	3.2	EOG $V_{hub} = V_{in}, V_r \pm 2 \text{ m/s}$ and V_{out}		U	N
	3.3	EDC $V_{hub} = V_{in}, V_r \pm 2 \text{ m/s}$ and V_{out}		U	N
4) Normal shut down	4.1	NWP $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$		F	*
	4.2	EOG $V_{hub} = V_r \pm 2 \text{ m/s}$ and V_{out}		U	N
5) Emergency shut down	5.1	NTM $V_{hub} = V_r \pm 2 \text{ m/s}$ 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 conditions	7.1	EWM 1-year recurrence period		U	A
8) Transport, assembly, maintenance and repair	8.1	NTM V_{main} to be stated by the manufacturer		U	T
	8.2	EWM 1-year recurrence period		U	A

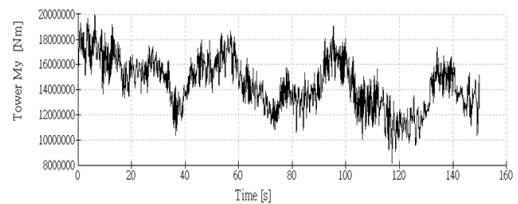


圖4 塔架負載

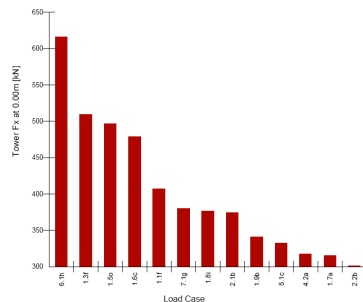


圖5 塔架於不同設計條件下的負載

4. 風力機結構模態分析

結構的模態可以藉由許多精密的分析工具求得詳細模型，但是這樣的模型過於複雜，反而造成控制器設計的困難。因此，通常使用多體系統(Multi-body system)的分析方法，將結構分成許多段的質點，依照選定的自由度來降低模型的複雜程度(order)。單一質點，具備單一特徵頻率，單一模態路徑(mode shape/path)或稱作是變形方式。而連續質點，理論上就會有無窮多的特徵頻率與路徑。分析方式可透過計算懸臂樑(Cantilever Beam)響應的 Euler 公式(1)，求得各個模態的響應，也就是元件不同頻率下的變形量以及對應的模態路徑(mode path)或模態形狀(mode shape)。如同圖 6 所示，每個模態的變形量相對於樑臂的距離關係都不同，越低階形狀越簡單，越高階的模態形狀就越複雜，可由路徑經過原點的次數看出複雜程度。

$$Y(x) = C_1(\cos(kx) + \cosh(kx)) + C_2(\cos(kx) - \cosh(kx)) + (1) \\ C_3(\sin(kx) + \sinh(kx)) + C_4(\sin(kx) - \sinh(kx))$$

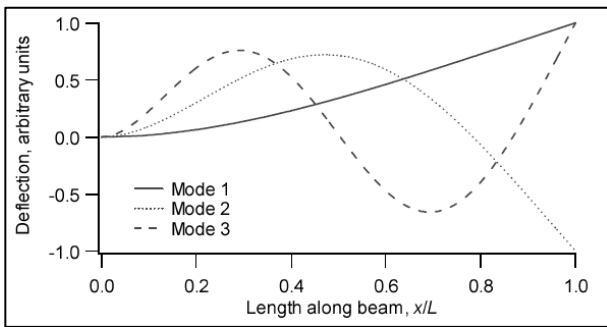


圖6 懸臂樑不同模態的變形[7]

由於風力機系統中包含了很多懸臂樑的元件，例如葉片、傳動軸以及塔架，振動的現象如圖 7 所示，包含了傳動軸的扭曲、葉片的彎曲(flapwise 與 edgewise 兩個方向，又可稱為旋轉平面外與平面內的彎曲)、以及塔架的彎曲，包含前後(fore-after)與左右(side-side)兩個方向。

所以便可藉由上述 Euler 公式來求得相對應的共振頻率。風力機系統中，由於旋轉頻率不高，通常只需考慮前兩個模態頻率(mode frequency)即可符合控制系統的頻寬需求。如果每個樑都視為兩個自由度，只取前兩個模態。再考慮不同方向的振動(X&Y 方向)，每根樑每個方向都有兩個模態，風力機系統結構中前兩階的模態可簡列如下：

- 塔架模態：共 4 個模態/自由度。
 - 第一及第二左右振動模態(Side-side)，如圖 8 左側圖，為第一階(1st)的示意圖。
 - 第一及第二前後振動模態(Fore-after)，如圖 8 右側圖，為第一階(1st)的示意圖。
- 葉片模態：共 12 個模態/自由度。
 - 平面外(Out of plane or flapwise)共 6 個。
 - 三組葉片的第一階(1st)

- 三組葉片的第二階(2nd)
- 4 個非對稱，2 個對稱，圖 9 所示為 3 個第一階(1st)的振動模態。

- 平面內(In plane, or edgewise)共 6 個。
 - 三組葉片的第一階(1st)
 - 三組葉片的第二階(2nd)
 - 其中 4 個為非對稱，2 個為對稱。圖 10 所示為 3 個一階的振動模態。其中第 3 個第一階模態又稱為 collective mode，如圖 10 的最右方圖示。

- 傳動系統扭矩(Drive Train torsion)：共 1 個自由度。

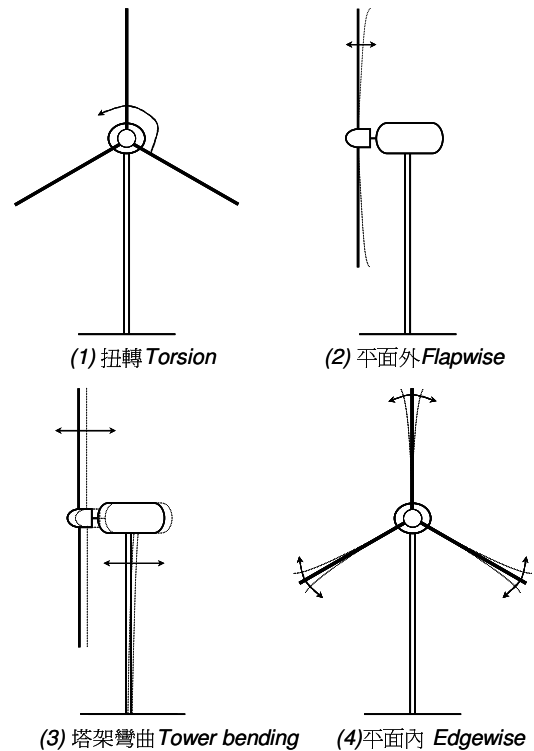


圖 7 風力機振動現象(redraw from [4])

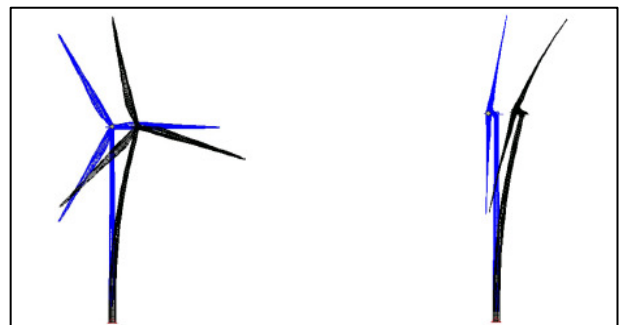


圖8 塔架左右與前後方向的一階振動模態[5]

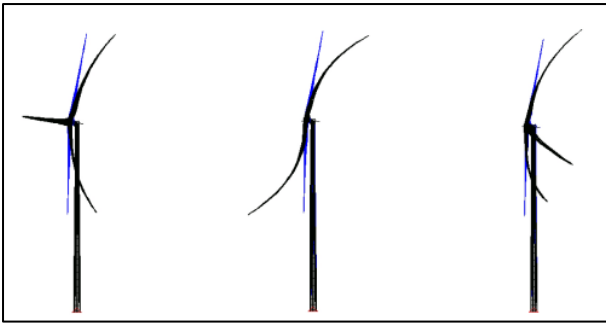


圖 9 葉片平面外前三個第一階(1st)振動模態[5]

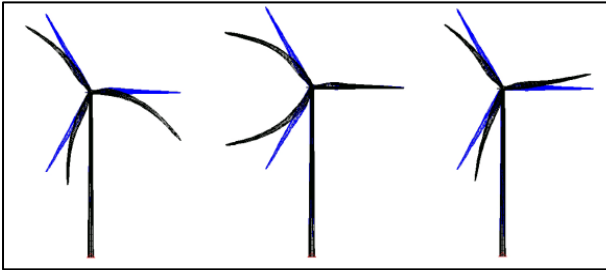


圖 10 葉片平面內前三個第一階(1st)振動模態[5]

以此估算，整個風力機系統共有 17 個模態。由圖 8~10 可觀察到不同模態下，葉片或是塔架的變形模式。三個葉片可能有對稱或是不對稱的變形方向。圖 11 將系統簡化為結構體圖表示出所有的自由度。自由度(DOF)的數量可依照對系統模型複雜程度的需求來設定。

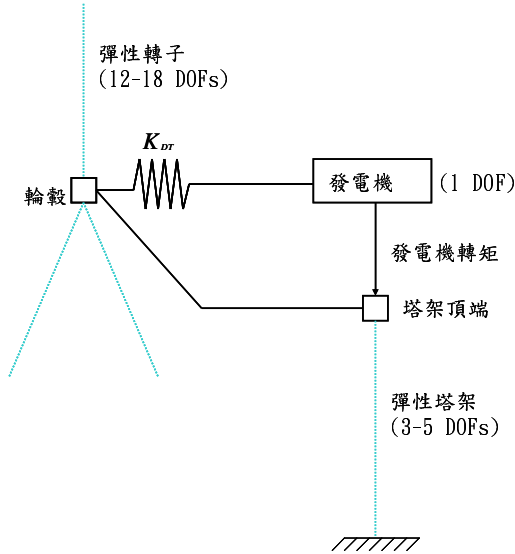


圖 11 風力機結構自由度示意圖[5]

以軟體[6]協助模擬計算，可將所有模態頻率計算出來。如圖 12 所示，葉片的第一階平面外(out of plane)頻率為 1.08Hz，第二階平面外頻率為 2.82Hz，塔架的前後模態頻率則為 0.44Hz 等等。若考慮旋轉(rotating)時的效應，頻率會稍微增加。

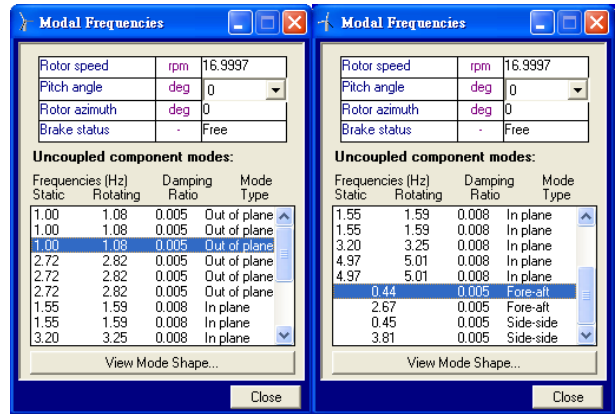


圖 12 風力機葉片與塔架各模態頻率

所有模態中，必須特別注意傳動扭矩模態(Drive Train Torsion)。由於在額定狀態下，發電機的力矩會維持固定的額定力矩。這種狀況下，任何傳動軸的振動可能有阻尼過低的情形，激發此模態的振動，會對齒輪箱產生很大的力矩，因此必須特別注意，以免對傳動系統與齒輪箱造成損害。

同時，如之前提及，由於各模態之間是互相影響，因此必須考慮是否有其他模態對此模態有較大的影響。在這邊，塔架的 side-side 第二階、以及葉片平面內的第三個第一階模態(collective mode)是必須另外注意的，變形曲線如圖 13 與 14 所示。由於對傳動扭矩的振動有較大的貢獻，因此如果激發這兩個共振模態，對於傳動扭矩這個模態也是很危險的。所以，可以透過外加方式，安裝具備彈性的基座。或是藉由調整發電機力矩命令來吸收。藉由測量發電機轉速，透過濾波器，在共振頻率處增加"ripple"項到力矩與功率中，便可以有效的降低齒輪箱的負載。

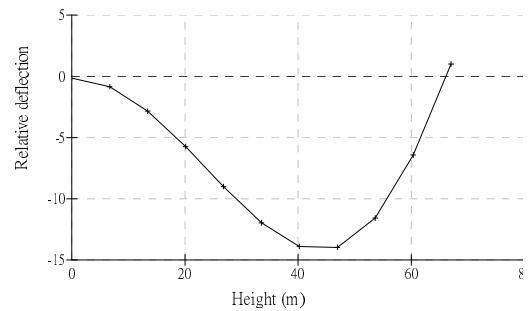


圖 13 塔架第二階模態變形(2nd side-side mode)

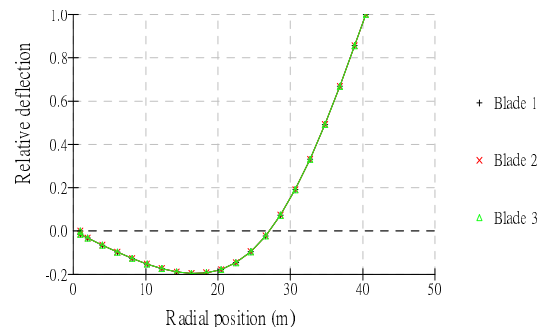


圖 14 葉片面內第三個一階模態變形(collective mode)

5. 週期性負載對結構的影響

所有的風力機主要模態，與其所承受的週期性負載之間會互相影響。圖 15 為風力機葉片在轉子的不同角度時所承受的負載變化狀況，負載變化如同弦波形狀。經過傅立葉轉換後可得到其頻率響應。如果該頻率與上一節所估算的結構頻率有重疊之時，系統就會產生共振現象。

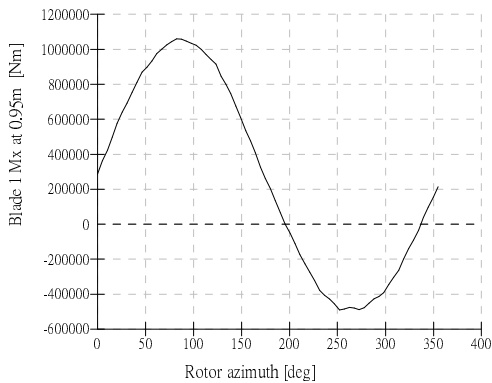


圖 15 葉片負載與轉子角度的關係

其他像是葉片所承受的重力負載(1P)、風剪切(wind shear, 1P, 2P, 3P)、塔架陰影效應(tower shadow, 1P, 2P, 3P, 4P)、轉向誤差(yaw error, 1P)、結構載荷(3P, 6P, 9P)等等，都是在設計時必須考慮的項目。其中，nP 中的 P 代表的是每圈(Per revolution)，也就是風力機每轉一圈會遭遇 n 次該負載。以塔架陰影(tower shadow)為例，風力機每轉一圈，每個葉片在 180 度角(以頂點為零度)時，都會掃過下方的塔架一次。每轉一圈就會經歷 3 次的塔架陰影所造成的負載變化，因此為主要就是 3P 的週期性負載。再根據當時轉速就可以換成出實際的頻率。以 10rpm 的轉速為例，頻率就是 10rpm/60 秒*(3P)，為 0.5Hz。

利用 Campbell 圖，可以將所有結構模態與 nP 的負載，根據不同的轉速所對應的頻率，在同一個圖形中。如圖 16 所示，上述的 16 個結構模態與 nP 負載會有交錯的點，即為可能發生共振的頻率。可利用此圖避免結構自然頻率(natural frequency)與激振頻率(exiting frequency)有交點，產生共振。在圖 16 中，可看到最上方的曲線為平面內的第六個模態(rotor in plane mode 6)的頻率比其他模態頻率高出許多，在 8.7Hz，一般會忽略這個頻率，以 16 個模態來評估就非常足夠，即使是葉片的平面內第 4 第 5 個模態，在目前的系統中也都遠大於其他頻率。因此，可將圖修正為圖 17，來觀察與各負載間的關係。

如果發現主要頻率與週期性負載頻率有交點，如重要的 3P；那麼在設計控制器時，就可以用簡單的手法避開。透過轉速控制的方式，在葉輪轉子轉到該轉速附近時，變先固定轉速。等待轉矩上升，超過一定值時，再讓轉速迅速的通過共振點，這樣便可以避開系統停留在

該共振點運轉，而造成對系統結構的傷害。在變速風力機系統上，這是簡單且常用的手段。

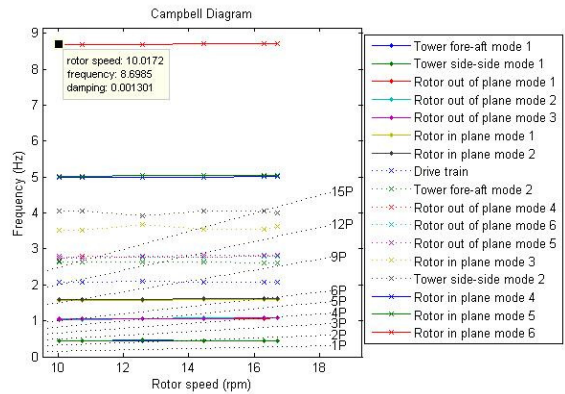


圖 16 風力機結構模態之Campbell圖(17個模態)

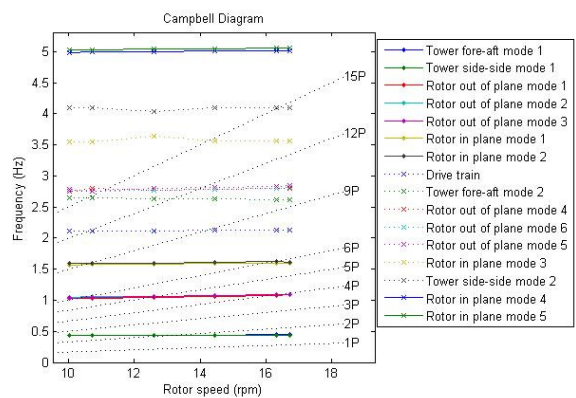


圖 17 風力機結構模態之Campbell圖(16個模態)

6. 結論

本文從系統負載面出發，介紹風力機系統於操作時所必須考慮的負載效應。以便於設計階段進行驗證，使系統各部位元件能夠符合認證規範的要求。從負載分析中，可以了解到重要元件如葉片、塔架在各種風況向極限陣風中，所承受的負載，然後判斷設計是否符合規格。透過模態的分析，可以了解運轉時產生的各種週期性負載與結構元件的共振頻率是否重疊，而導致劇烈共振，損害結構的可能性。然後透過 Campbell 的圖形，幣可以輕易的找出共振點，透過控制手段避開，使系統在各風速/轉速下，都能夠穩定的運轉。

致謝

本文為經濟部能源局補助之風力機設備產業技術開發計畫(98-D0107)執行成果。感謝能源局的支援，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

參考文獻

- [1] International standard, "IEC 61400-1 Wind Turbines – Part1: Design requirements", 3rd edition, 2005.
- [2] EWEA Report, "Prioritising Wind Energy Research - Strategic Research Agenda of the Wind Energy Sector", pp27-28, July 2005.
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/Galloping_Gertie

- [4] Fernando D. Bianchi, Hernan De Battista and Ricardo J. Mantz, "Wind Turbine Control Systems", Springer, London, 2007. P32
- [5] Joris PEETERS, "Simulation of dynamic drive train loads in a wind turbine", PhD thesis of Leuven University, Belgium, July, 2006. P86
- [6] Garrad Hassan, "Bladed User Manual", ver3.8, 2007.
- [7] David-Pieter MOLENAAR, "Cost-effective design and operation of variable speed wind turbines", Ph.D. Thesis of Technical University Delft, Netherlands, 2003. P113