

行政院及所屬各機關出國報告

(出國類別：實習)

風力機組運轉性能評估技術

服務機關：台灣電力公司

出國人職稱：機械工程師

姓名：陳景林

出國地區：德國

出國日期：104年6月2日至6月11日

報告日期：104年8月6日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：風力機組運轉性能評估技術

頁數 23 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

陳景林/台灣電力公司/綜合研究所/機械工程師/ (02) 26815424#2210

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：104年6月2日至6月11日

出國地區：德國

報告日期：104年8月6日

分類號/目

關鍵詞：風機老化、功率曲線

內容摘要：(二百至三百字)

風機老化對於一個機械產品而言，係一個不可避免的自然過程。風場所產生的電力，隨著運轉年限增加將逐年遞減，據統計因風機老化其發電量將逐年遞減 $1.6 \pm 0.2\%$ ，亦即其負載因素將由新風機的 28.5% 逐年遞減至第 19 年的 21%。可能原因為可用率下降、氣動性能降低或轉換效率下降。探討風機性能衰退的原因極其複雜。大多數的風場隨著使用時間愈久，其負載因數逐年遞減，雖然有少數風場其負載因數增加，但此僅可視為大多數衰減風場的異類。

風機的發電性能特徵主要係以功率曲線(power curve)表示，功率曲線可分為三階段：(1)partial load range: 提升風機在partial load階段的效率、(2)power up-rate range: 提升風機的額定功率(rated power)、(3)extend range of operation: 提升風機的cut-out速度。在partial load階段，可使用葉片附加裝置以提升風機運轉性能；因cut-in風速與葉片的氣動設計有關，故對於既有風機而言，調整cut-in風速對於發電量的提升幫助不大。在power up-rate階段，可利用發電機的邊際效用提升風機功率。在extended range of operation階段，較常見的做法係提高風機的cut-out風速，並調整pitch angle使其發電量逐漸地降低。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://report.nat.gov.tw/reportwork>)

目 錄

出國報告書審核表

出國報告書提要

目 錄	.....	I
圖 目 錄	.....	II
表 目 錄	.....	III
第 壹 章 前 言	.....	1
1-1、出 國 緣 由	.....	1
1-2、出 國 目 的	.....	1
1-3、出 國 行 程	.....	2
第 貳 章 風 力 機 組 老 化	.....	4
2-1、風 機 老 化	.....	4
2-2、風 機 的 性 能 驗 證	.....	5
第 參 章 風 機 運 轉 性 能 提 升 技 術	.....	11
3-1、風 機 功 率 曲 線	.....	11
3-2、風 機 性 能 提 升 所 採 取 之 改 善 措 施	.....	13
3-2、K2所 建 議 之 風 機 性 能 提 升 方 式	.....	22
第 肆 章 心 得 及 建 議 事 項	.....	23

圖 目 錄

圖 2-1 各風場運轉年限與負載因數分佈圖	5
圖 2-2 各風場的負載因數衰減率	5
圖 2-3 風機葉片旋角相差 1 度，將導致風機年發電量減少 5%	8
圖 2-4 風場效率評估流程圖	10
圖 3-1 風機的功率曲線	12
圖 3-2 K2 所建議之風機性能提升方式	22

表 目 錄

表 3-1 風機性能提升之改善措施

13

一、前言

1-1、 出國緣由

鑒於日本福島之核能事故，世界各工業國家紛紛延緩核能發電，如德國、丹麥、瑞士及義大利，並提高再生能源比重。我國為因應此一趨勢，亦制定新能源政策，訂定 2030 年前再生能源比重由 8% 提升至 16%，為此能源局已啟動「陽光屋頂百萬座」及「千架海陸風力機」兩項計畫，希望能夠提前達成目標。未來陸域及離岸的風機數量將達千架之多，故如何持續維持風機在最佳的運轉狀態，已成為日益重要的研究課題。

風力機組由於老化效應(aging effect)，隨著使用年限愈久，其發電量亦逐年降低，據統計因風機老化其發電量將逐年遞減 $1.6 \pm 0.2\%$ ，亦即其負載因素(load factor)將由新風機的 28.5% 逐年遞減至第 19 年的 21%。導致風機性能衰退的原因極其複雜，例如可用率、氣動因素或轉換效率等。本公司陸域風機迄今共 161 部，早期風機設置已達十幾年，目前均面臨風機性能日益老化之問題，此將導致發電收益降低及延長風機投資的回收年限。目前國內對於風機性能衰退之原因及改善均無經驗，茲為提升風機之發電效益，實有必要派員前往國外先進國家研習此一技術，探討風機性能衰退之原因及其改進之道。

1-2、 出國目的

1. **目的**：探討風力機組運轉性能老化之原因，並研提風機運轉性能提升之改善對策。
2. **緣起**：風力機組由於老化效應(aging effect)，隨著使用年限愈久，其發電量亦逐年降低，據統計因風機老化其發電量將逐年遞減 $1.6 \pm 0.2\%$ ，亦即其負載因素(load factor)將由新風機的 28.5%逐年遞減至第 19 年的 21%。
3. **實施要領**：(1)探討風力機組運轉性能老化之原因、(2)功率曲線 Partial load range 性能提升之可行性探討、(3)功率曲線 Power up-rate 性能提升之可行性探討、(4)功率曲線 Extend range of operation 性能提升之可行性探討。
4. **要求成果**：(1)探討風力機組運轉性能老化之原因、(2)研提風機運轉性能提升之改善對策。

1-3、出國行程

本次研習期間為104.6.2~104.6.11，共計10天。民國104年6月2日搭乘長榮航空班機，經曼谷轉機，於當日抵達阿姆斯特丹國際機場，翌日搭乘ICE前往漢堡；6月4~9日赴K2 Management公司研習風機運轉性能評估技術；6月10日由漢堡搭乘ICE前往阿姆斯特丹；當晚搭乘長榮航空班機，經曼谷轉機，於6月11日返回台北。

詳細行程如下：

6/2 台北→曼谷→阿姆斯特丹
6/3 阿姆斯特丹→漢堡
6/4~9 K2 Management
6/10~11 漢堡→阿姆斯特丹
 阿姆斯特丹→曼谷→台北

二、風力機組老化

2-1 風機老化

風機老化(ageing effect)對於一個機械產品而言，係一個不可避免的自然過程。風機所產生的電力，隨著運轉年限增加將逐年遞減。探討風機性能衰退的原因極其複雜，可能原因為可用率下降、氣動性能降低或轉換效率下降。圖 2-1 顯示英國各風場的平均功率因素，圖中顯示，平均功率穩定的以每年 $0.44 \pm 0.04\%$ 的速率遞減。圖 2-2 所示為英國各風場啟用時間及負載因數衰減之關係圖，由圖中可知，大多數的風場隨著使用時間愈久，其負載因數逐年遞減，雖然有少數風場其負載因數增加，但此僅可視為大多數衰減風場的異類。

風機退化之原因:

- Mechanical wear?
- Early death?
- Increasing downtime?
- O&M practices?

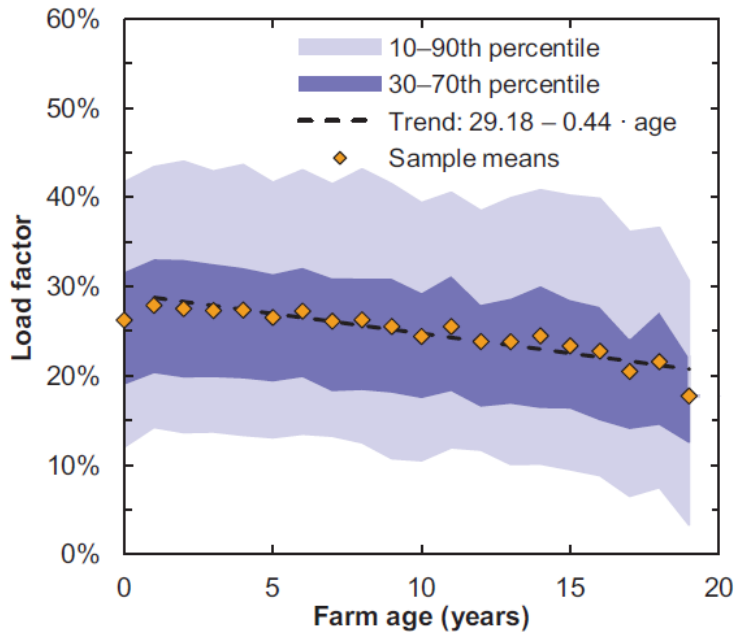


圖2-1 各風場運轉年限與負載因數分佈圖

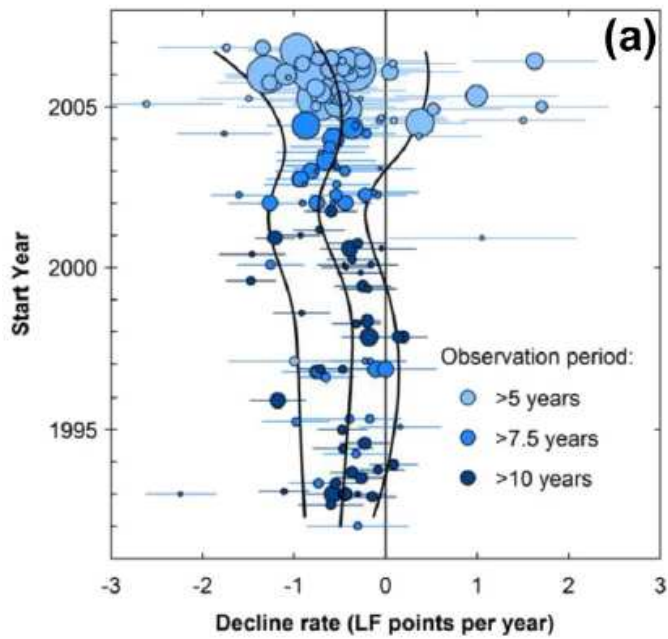


圖2-2各風場的負載因數衰減率

2-2 風機的性能驗證

一個風場的經濟效益主要繫於風能、風機出力及可用率。最近有許多風場均反應其輸出的功率較所預測的功率低。造成風機實際輸出功率較預測值低的可能原因如下：

(1) 風能評估不當

最常見的原因是進行不適當的風場評估，大多數的風場評估係由 10 公里外的觀測站數據，再利用氣象模式進行風能評估；或者係由量測儀器的不確定性所造成。尤其是在複雜地形，若以單點的觀測資料代表整個風場時，此問題將更加凸顯。在複雜地形，距離超過 1 Km 以上，氣象條件即可產生大幅變化。另氣象觀測塔的高度經常設置在 10 m 高處，與風工程所需的 Hub 高度不同，易造成其觀測資料的不確定性增加。另外，所使用的評估軟體亦有其不確定性，例如是否考慮地形傾斜度、大氣穩定性及所使用模式的不確定性等。總之，對於潛在風場進行長期觀測(至少 1 年以上)，將可大幅降低觀測資料的不確定性。

(2) 每年的風能均不同

風場每年的風能變化約在 10%，且每個風場的風能變化均不相同。只有在每個風場經由長期的觀測，才能提供正確的入流風況，以進行風能評估。

(3) 實際輸出功率與功率曲線之差異

大多數的風機製造廠家所提供的功率曲線，均係在原型機(prototype)上所量測的。原型機與實際的風機不同，例如實際的風機其設定並非在最佳的狀態，將造成發電量的差異。如圖 2-3 所示，風機葉片旋角(pitch angle)相差 1 度，將導致風機年發電量減少 5% 的巨大損失。因此建議藉由量測技術，對風機進行功率曲線驗證，以取得風機的最佳運轉條件，俾使風機的功率曲線可達到風機製造廠家所提供的保證值。另外，風機的功率亦可能受到下列因素影響，例如風機葉片的老化(材料的磨耗)或環境的衝擊(葉片的污垢)。

風場由於蚊子很多，故風機運轉時蚊子經常沾黏在風機葉片的 leading edge 處，此將影響風機的發電效率。經訪查本公司的風機葉片並沒有進行定期清洗。因此 K2 公司再三強調，定期清洗風機葉片係非常重要的工作，K2 建議應每隔 2~5 年定期清洗風機葉片，約可提升 1% 的發電量。

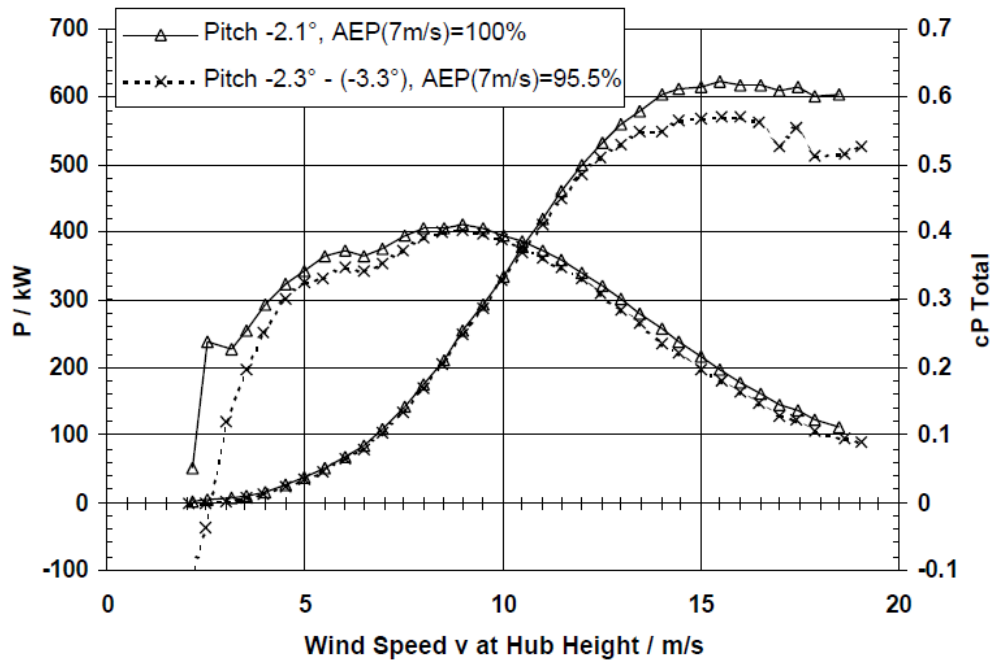


圖 2-3 風機葉片旋角相差 1 度，將導致風機年發電量減少 5%

(4) 可用率較預估值低

風機的年發電量與風機的可用率(availability)有關，大多數的風機製造廠家均對其客戶保證其可用率。例如，提供 98%的可用率保證，但如果此 2%的停機係發生在風機滿載時段，則全年將損失 8%的發電量。

風機的性能驗證主要係驗證風機的功率曲線(power curve)，茲分為下列三部分介紹：

(1) 利用測風塔進行單一風機的功率曲線驗證

風機的發電量與 Hub 高度的風速大小有關，而 Hub 高度的風速則係利用測風塔進行量測。故如果得知風機所在地的風速分佈，則可計算單一風機的年發電量。此方法所計算出的年發電量，其不確定性為 5~10%，最大的不確定性係來自速度的量測。風機與測風塔的距離一般為 2~4D，進行觀測資料篩選時，觀測數據只有在風機與測風塔均不受氣流干擾的條件下才被採用，亦即氣流並未受到障礙物或其他風機影響。如果在複雜地形，則在風機所在地需設置第 2 座測風塔，以了解複雜地形對氣流所造成的擾動情形。然而，隨著 Hub 的高度愈高，測風塔的成本亦愈高。

(2) 利用機艙上風速計進行單一風機的功率曲線驗證

機艙上風速計由於氣流受到機艙及風機葉片影響，故必須修正至未受干擾的氣流狀態，此風速修正公式與機艙形狀、葉片幾何形狀及風速計的接合方式有關，每一類型風機的修正公式製訂必須利用未受擾動的測風塔，根據 IEC61400 之規定進行。利用機艙上風速計進行功率曲線驗證，可減少測風塔的昂貴成本；惟仍須注意下列事項：

- (A) 風速計必須要進行校正。
- (B) 原型機與風機的風速計種類及其接合方式必須要一致。
- (C) 風速計對於傾斜氣流(inclined flow)必須要較不敏感。
- (D) 待測風機的入流風風向不可位於鄰近風機的尾流中心。

此方法有一缺點，此風速計修正式對於風機的設定參數(例如 pitch

angle)及複雜地形的傾斜氣流非常敏感。

(3)風場效率

如圖 2-4 所示，藉由精確的風場量測儀器，可得出風機的入流風速；利用流場模式可得出風場的速度場分佈；利用風場模式可計算風機的相互尾流影響及其發電量。

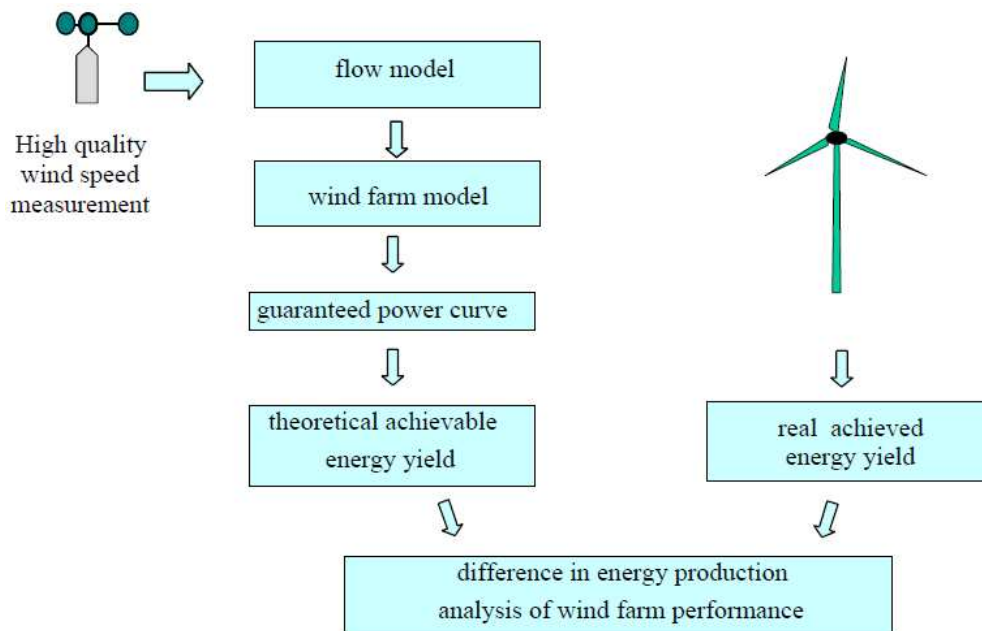


圖 2-4 風場效率評估流程圖

三、風機運轉性能提升技術

3-1 風機功率曲線

風機的發電性能特徵主要係以功率曲線(power curve)表示，如圖3-1所示。功率曲線可分為三階段：(1)partial load range: 提升風機在partial load階段的效率、(2)power up-rate range: 提升風機的額定功率(rated power)、(3)extend range of operation: 提升風機的cut-out速度。在partial load階段，可使用葉片附加裝置以提升風機運轉性能；因cut-in風速與葉片的氣動設計有關，故對於既有風機而言，調整cut-in風速對於發電量的提升幫助不大。在power up-rate階段，可利用發電機的邊際效用提升風機功率。在extended range of operation階段，較常見的做法係提高風機的cut-out風速，並調整pitch angle使其發電量逐漸地降低。

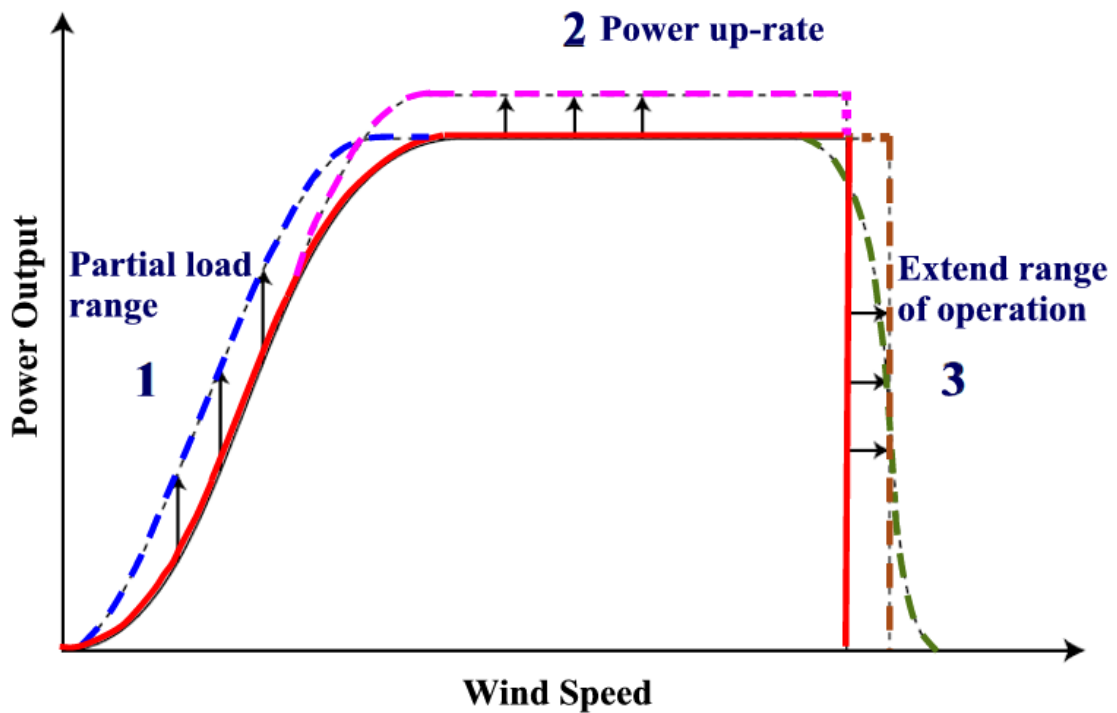


圖3-1風機的功率曲線

Partial load range:

對於此區域的風機性能提升，葉片的氣動性能係扮演著最關鍵的角色。

Power up-rate:

在此區域風機的功率係取決於風機的最大容量(capacity)及高荷重下的安全運轉考量。如欲提升出力，則需要降低風機所受的荷重 (loading)，如thrust load及各種負載。

Extend range of operation:

如欲延長cut-out的範圍，風機仍然是受到硬體容量(hardware capacity)的限制。然而如能確保風機安全運轉及高風速時停機的條件下，藉由添加additional feature或smart feature來延長風機的運轉範圍，確實係有較大的可行性。可藉由pitch的smart control來減低風機在高風速時的荷重。

3-2 風機性能提升所採取之改善措施

表3-1所示為在Partial load efficiency、Power up-rate及Extended operation range此三階段，如欲提升風機性能所能採取的改善措施，茲分述如後。

表3-1風機性能提升之改善措施

Categories	Activities	Partial load efficiency	Power up-rate	Extended operation range
Improve wind turbine control	●Control system updating	✓	✓	✓
	●Wind farm control	✓	✓	
	●Pitch control	✓		✓
	●Intermittent wind energy capture	✓		
	●Handle special conditions	✓		✓
Tuning and	●Site specific tuning	✓	✓	

optimization	<ul style="list-style-type: none"> ● Individual turbine tuning ● Nacelle misalignment 	✓	✓	
Aerodynamic performance	<ul style="list-style-type: none"> ● Blade adds-on ● Increase blade size ● Blade cleaning/restoration 	✓		
Retrofits and modernization	<ul style="list-style-type: none"> ● Overhaul and modernization ● Retrofit control systems ● Retrofit drivetrain components ● Retrofit electrical systems ● Grid compatibility ● Restoring power performance 	✓	✓	✓

Improve wind turbine control

將智慧型控制系統(smart control system)整合至風機性能提升中，可使風機控制系統更有彈性及風機有更大的出力。

(1) Control system updates

更新風機的控制系統，可提升各階段功率曲線的輸出。智慧型控制系統可提升能源效率，降低風機的荷重及減少風機元件的磨損。控制系統軟體的更新包括控制演算法(algorithm)的改進

及調整控制參數。

(2) Wind farm control

一個風場的能源產出最重要的因素係將整個風場視為一個單元(unit)，且善加管理，並非著重在單一風機的性能。有時候為了整個風場的效率，可對單一風機進行調整，調整的準則係依據風機所受的紊流及尾流而定。

(3) Pitch controls

風機葉片旋轉時，葉片在最高位置與最低位置所受的風速不同，智慧型 pitch control 係可控制每一片葉片的旋角，可提升風機的運轉效率及降低風機所受的荷重。

(4) Intermittent Wind energy capture

如果能預測或量測風機前方來風的風速，則可事先調整風機的控制系統，以獲取最大的風能。目前較看好利用 Lidar 進行風機前方入流風速的量測。

(5) Handling of special conditions

如遭遇特殊的環境災害，如颱風、閃電、或系統不穩定，將造成風機停機或運轉效率不佳，可在控制系統中加入特殊事件

的控制，以提升風機的可用率及發電效率，擴展風機功率曲線的運轉範圍。

Tuning and optimization

風機係依據 IEC61400 之等級進行製造，相同規格的風機被安裝在氣候及溫度均不同的風場；既使在同一風場，不同的風機所受荷重亦可能不同。故依據場址特性，對於個別風機進行調整(tuning)，可大幅提升風機的運轉性能。許多老舊的風場，將是風機性能提升的優先對象。

(1) Site specific tuning

依據場址的特定風況，可對風機的運轉模式進行參數設定。
特定風況所考慮的參述如下：

- (a) 風力特徵(風速及紊流)
- (b) 天氣、氣候及大氣條件(溫度及空氣密度等)
- (c) 季風及其在時間上的變化(variance)

(2) Individual turbine tuning

風場中的每一部風機均有其運轉特性，下列這些因素造成每部風機的運轉參數不同：

- 風花圖中的風向

- 風機所在的地形
- 運轉特性(運轉條件、荷重及歷史資料)

(3) Nacelle misalignment

近些年來，機艙的錯位(misalignment)所造成的發電量損失，已引起更多的重視。可利用超音波風速計或水平式 Lidar，進行風機入流風速風向的量測，以修正風機機艙的錯位現象。

Aerodynamic performance

在 partial load 運轉階段，風機的性能係依賴轉子掃掠過的面積及葉片的氣動性能。影響風機氣動性能最主要的因素為機翼(airfoil)的氣動性能、轉子速度及旋角控制(pitch controlling)。變更風機葉片並不可行，主要的性能提升方案包括 blade adds-on 及使葉片保持在良好狀態。茲分述如下：

(1) 葉片附加裝置(Blade adds-on)

目前最熱門的葉片維修方式係 blade adds-on，可提升葉片的氣動性能、降低噪音及增加風能的捕獲量。最常見的方式如下：

- (a) Vortex generators
- (b) Blade cord extensions
- (c) Trailing edge serrations

(d) Tip shape/winglets

其他的葉片附加裝置主要集中在葉片的保護方面，例如雷擊裝置及在 leading edge 處的防沖蝕裝置。由於葉片附加裝置可在現地快速的安裝，停機時間短，故此性能提升方案對於風機運轉的經濟效益而言風險較小。

(2) Blade size

決定風機葉片的尺寸係取決於風力特徵而定，大轉子葉片亦謂可獲取較大的風能，惟所受的風荷重亦相當大。故風機的研發廠商經常聚焦於輕且堅固的葉片材料。

(3) Blade restoration

葉片由於暴露在外，經長時間的磨損或沾汙，將影響風機的運轉性能。葉片維修的必要性，與風場的狀況息息相關。有些風場或許不需要葉片維修，有些風場就需要定期的清洗或修補葉片。葉片維修對於風機的氣動性能有顯著的影響。

Modernization and retrofitting

風機性能提升可藉由下列方式達成：增大葉片尺寸、控制系統現代化及動力傳動系統升級。除非有必要，否則風機業者不會更換大型組件，主要係因為費用昂貴及長久的停機時間。故主要的性能提升均集中在小

型且費用較低及較無風險的改善方案。

(1) Overhaul and modernization

風機的翻修及現代化包括所有元件的翻修或換新，例如軸承、葉片、控制系統、齒輪箱及電氣系統。風機的現代化主要係對於風機的再投資，主要延長風機的運轉年限。風機經過現代化之後，功率曲線各階段的性能均可獲得提升。

(2) Retrofit entire control systems

維修陳舊的控制系統，包括控制機構的更新，可使老化的風機具有顯著的效益。且可藉由智慧型控制降低葉片所受的荷重，可使風機在高風速時更安全的運轉，故可提高風機的 cut-out speed。

(3) Retrofit drivetrain components

可藉由更新動力傳輸機構以提升風機運轉性能，動力傳輸機構包括轉子、齒輪箱、發電機及主要的機械傳動元件。

(4) Retrofit electrical systems

電力系統在能源轉換時均會有耗損(losses)產生。通常不會為了提升發電效率而更換電力系統，一般均係在電力系統過於陳

舊，已達發電瓶頸時才予以更換。

(5) Grid compatibility

另一種更新電力系統的方式係更新電網，高品質的電力需要干擾少、穩定的頻率及電壓。由於風力斷斷續續的特性，故為維持電網的穩定性，風能預測係必要的措施。

(6) Restoring power performance

對大多數的風機而言，隨著時間愈久，風機的運轉性能及可用率均逐漸衰減，故欲恢復已衰減的風機性能，即是利用風機的性能提升技術將風機回復至原有的運轉性能。

未來趨勢

所有的風機製造廠家均在進行風機性能提升的工作，目前持續進行的項目包括氣動性能、測速儀器及風場優化。

Aerodynamics performance in focus

風機的性能提升方案大多聚焦於氣動性能方面，葉片的尺寸大小對於風能的捕獲具有顯著影響，故大尺寸葉片主要係應用於大型風機上。近些年來，風機製造廠家在陸域及離岸已發展出 5~8 MW 大型風機。氣動的附加裝置經常出現在葉片的維修中，vortex generator 常安裝在新或

舊的葉片上，blade chord extensions 及 trailing edge serrations 則常見於維修方案中。其他的葉片附加裝置則集中於 leading edge 及 blade tip 的防雷擊裝置。

Site optimization

目前的工作重點主要是針對風場的特定風況，調整風機的控制參數，使其運轉性能達到最佳化。

Improved Anemometry

某些風機製造廠家已開始在機艙上裝設超音波風速計，以改善低風速時的精確度。藉由量測入流風速風向，可用以校正機艙的錯位及葉片的 pitching。IEC 目前所規定的風機性能評估設備係利用測風塔，其缺點是成本高及建置工期長，故精確的測風儀器可做為風機性能評估的工具。

Power uprating from factory

風機製造廠家亦有提升風機 5% 的邊際(marginal)功率案例，為配合此出力提升 5%，必須修改風機的發電機或電氣系統以符合較高的負載。

Glowing fleet of aging wind turbines

隨著運轉時間愈久，風機老化的機組日益增多，故對於老化風機的

維修及運轉性能提升的工作將日益重要。

3-3 K2 所建議之風機性能提升方式

K2 所建議之風機性能提升方式，如圖 3-2 所示。在 power up-rate 階段，係利用發電機的邊際(marginal)容許裕度(allowance)，以提高發電機的發電功率。惟此舉必須與風機製造廠家密切合作，因為風機功率提升，係來自風機的轉速加快，對於風機的軸承及齒輪等傳動元件是否可承受，需要與風機製造廠家密切合作做一詳細評估。目前丹麥已有此效率提升案例，惟 K2 基於商業保密條款，無法提供更詳細訊息。在 Extended operation range 階段，K2 建議採用線性的方式，利用 pitch control 將 power 逐漸降至零，藉此以避開 Enercon 的 cut-out 專利。

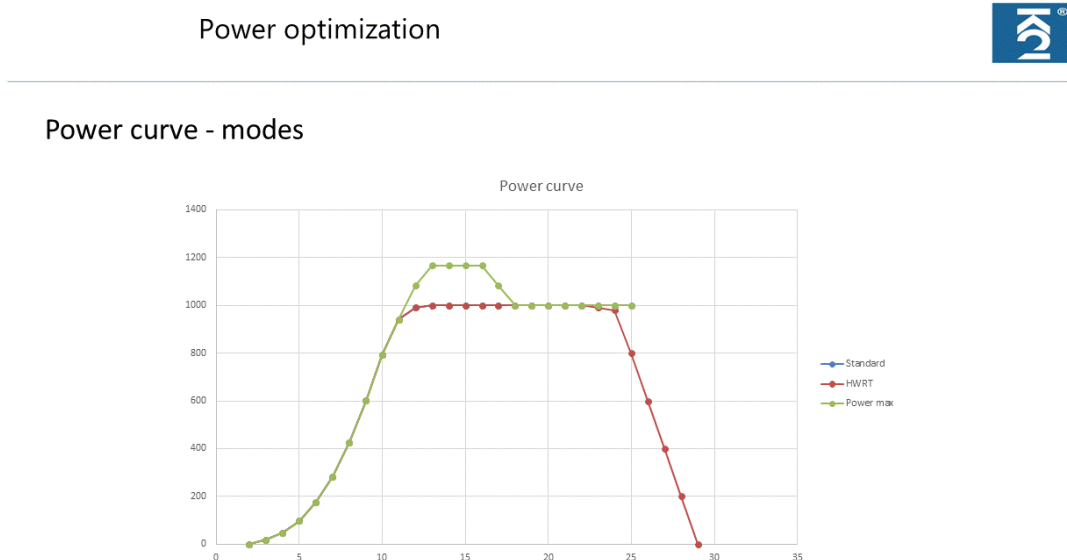


圖 3-2 K2 所建議之風機性能提升方式

四、心得及建議事項

- 1、風機老化(ageing effect)對於一個機械產品而言，係一個不可避免的自然過程。
風機所產生的電力，隨著運轉年限增加將逐年遞減。探討風機性能衰退的原因極其複雜，可能原因為可用率下降、氣動性能降低或轉換效率下降。
- 2、定期清洗風機葉片係非常重要的工作，應每隔 2~5 年定期清洗風機葉片 1 次，約可提升 1%的發電量。
- 3、風機的發電性能特徵主要係以功率曲線表示，風機性能提升可依功率曲線的三個階段分別進行：(1)partial load range:提升風機在 partial load 階段的效率、(2)power up-rate range:提升風機的額定功率(rated power)、(3)extend range of operation:提升風機的 cut-out 速度。
- 4、由於風機葉片的附加裝置(如 vortex generators、blade cord extensions、trailing edge serrations、tip shape/winglets)均可在現地藉由繩索攀爬快速的安裝，或將葉片拆卸在現地安裝。由於停機時間短且安裝快速，故此性能提升方案對於風機運轉的經濟效益而言風險較小。