

全球風力機齒輪箱維修技術與現況分析

The global overview and analysis of maintenance technology for wind turbine gearbox

作者： 林榮貴 工研院機械所 工程師 蔡鋒穎 工研院機械所 特約人員

* 關鍵字：風力發電機(Wind turbine)、齒輪箱(Gearbox)、維修(maintenance)

摘要

風力發電機為長壽命的產品，增速齒輪箱為風力發電機中重要之動力元件，其需要有非常高的可靠度設計與維運建置，其維修技術更是相當重要的一環。本文全球風力發電機齒輪箱維修技術與現況分析，乃依全球主要風力發電機齒輪箱維修廠商、技術文獻與規範如 IEC、GL、ISO 等相關現況與實際投入經驗來進行分析。其內容包含風力發電機及齒輪箱簡介、全球風力發電機齒輪箱故障問題、全球風力發電機齒輪箱維修趨勢、風力發電機齒輪箱測試驗證、風力發電機齒輪箱維修分析與展望等。

Wind turbines are long life-time products. The gearbox of wind turbine is an important power part which needs high reliable design and maintenance, so the maintenance technology for the wind turbine gearbox is an important issue. This article summarized the current maintenance technology and analysis for the wind turbine gearbox in the world. It refers to the major related companies, technical articles and related standards, such as, IEC, GL, ISO, etc. Practical experiences of maintenance for wind turbine gearbox are also presented. This article includes introduction of wind turbine and gearbox, failure problems of global wind turbine gearbox, maintenance trend of global wind turbine gearbox, test and certification of wind turbine gearbox and maintenance technology analysis and outlook of wind turbine gearbox.

前言

世界上的原油等能源正在快速減少當中，風力發電為一綠色環保的新興能源。增速齒輪箱為風力發電機中重要之動力元件，功能為將葉片轉動之能量傳輸至發電機，其動力傳遞過程為增加轉速，將葉片主軸輸入之轉速提升，使輸出軸進入發電機能以最高效率運轉發電。風力發電機為長壽命的產品，其增速齒輪箱需要有非常高的可靠度，故有必要對風力機增速齒輪箱維運作好建置來確保其營運品質，其維修技術更是相當重要的一環。本文全球風力發電機齒輪箱維修技術與現況分析，乃依全球主要風力發電機齒輪箱維修廠商、技術文獻與規範如 IEC、GL、ISO 等相關現況與實際投入經驗來進行分析。其內容包含風力發電機及齒輪箱簡介、全球風力發電機齒輪箱故障問題、全球風力發電機齒輪箱維修趨勢、風力發電機齒輪箱測試驗證、風力發電機齒輪箱維修分析與展望等。

風力發電機及增速齒輪箱簡介

風力發電機主要有水平軸式及垂直軸式兩種。其基本原理為透過風吹轉動葉片而帶動增速齒輪箱的輸入端低速軸旋轉(約 15RPM)，經由增速齒輪箱予以增速由其輸出端高速軸旋轉(約 1,800RPM)而帶動發電機發電。水平軸式風力發電機示意圖如圖一所示。

風力發電機使用之增速齒輪箱，通常採用三階平行軸式齒輪傳動(如圖二)，或三階混合

行星/螺旋齒輪傳動(如圖三)。

大型風力發電機使用之增速齒輪箱，承受極大的負載，且大多配置於環境較為惡劣場所；其重量多達幾十噸、配置又高維修不易，故其可靠度極為重要；當然齒輪箱的維修要求，更須與一般設備的作法不同了。

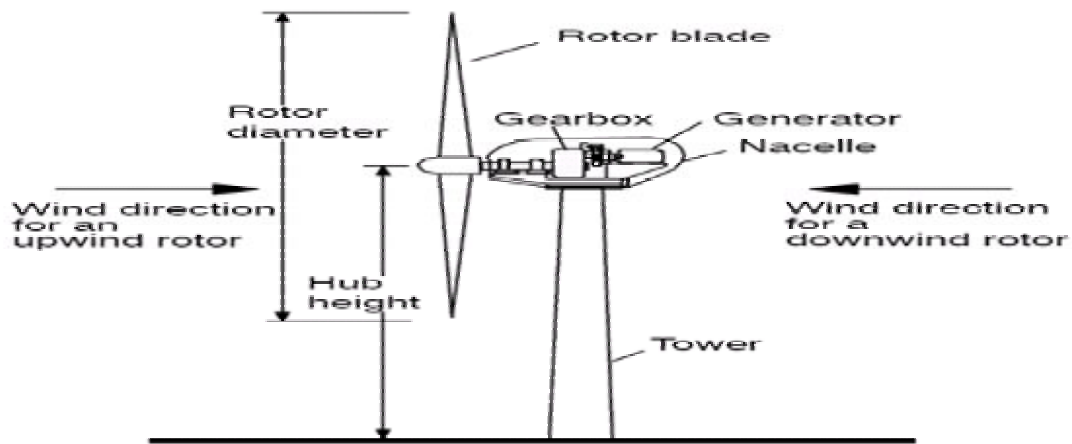


Figure A.1 – Horizontal axis wind turbine (HAWT)

資料來源：ANSI/AGMA/AWEA 6006-A03

圖一 風力發電機示意圖

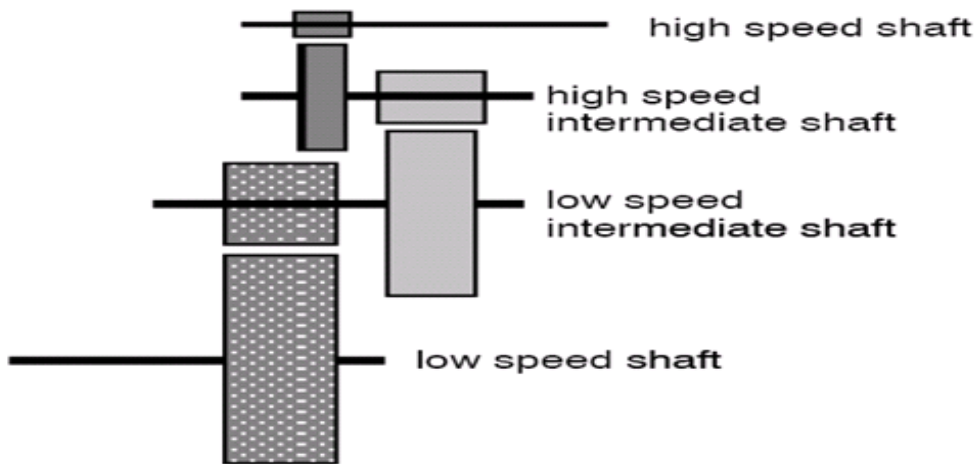


Figure 1 – 3 stage parallel shaft gearbox

資料來源：ANSI/AGMA/AWEA 6006-A03

圖二 三階平行軸式齒輪傳動示意圖

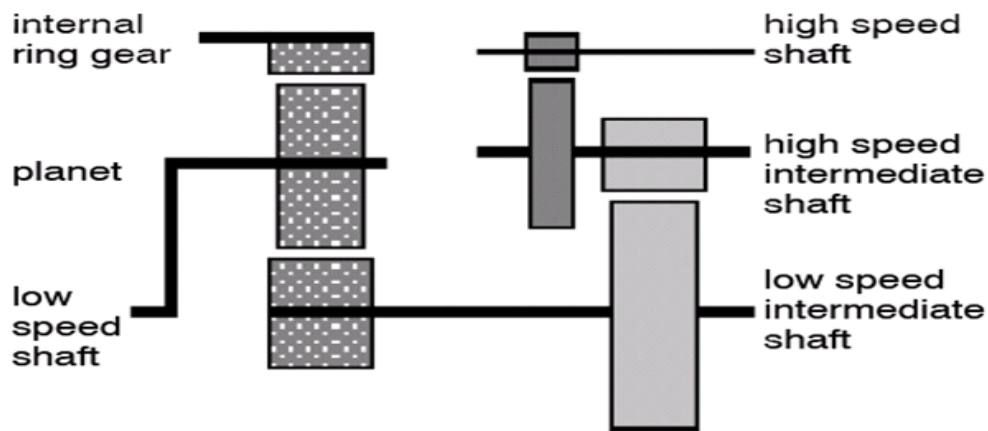


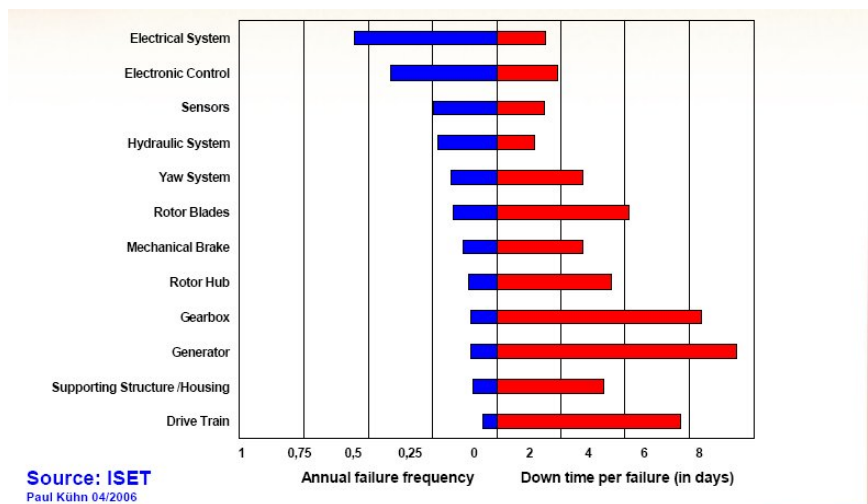
Figure 2 - 3-stage planet/helical hybrid

資料來源：ANSI/AGMA/AWEA 6006-A03

圖三 三階混合行星/螺旋齒輪傳動示意圖

全球風力機齒輪箱故障問題

全球風力發電機故障問題中，依 Sandia National Laboratories 引述，齒輪箱故障而停機時間耗時甚久(如圖四)，且由 Northern power system 公司調查，每次齒輪箱故障更換成本多達約 300,000 美元；故齒輪箱良好維運，對風力發電機營運效益，相當重要。



Failure Rates and Downtimes

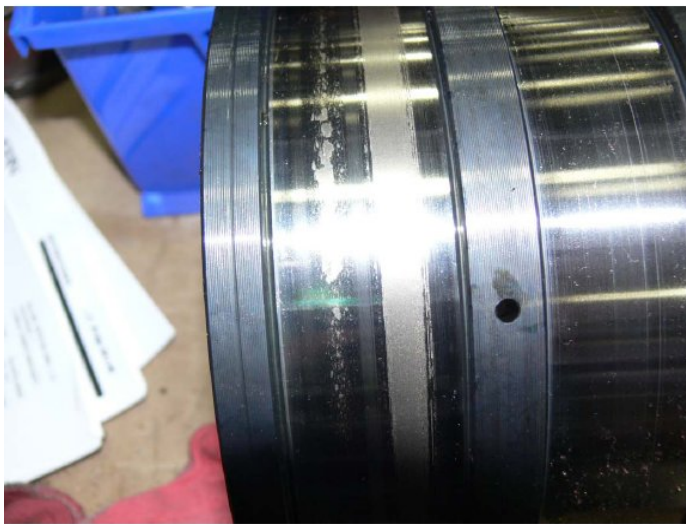


圖四 風力發電機零組件失效頻率與停機時間圖

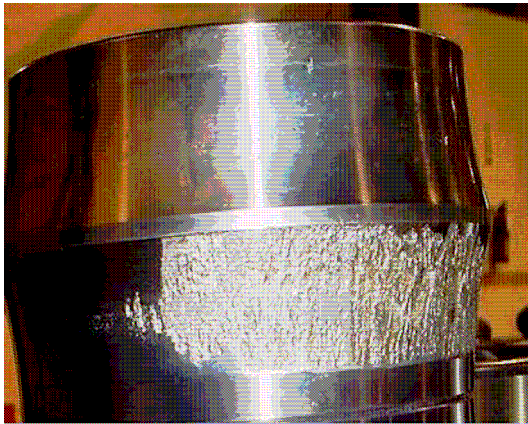
全球風力發電機齒輪箱故障問題，主要參考歐美風力發電機齒輪箱專業廠商如 Stork、Winergy、Grenna、GBS、SB、KHK、Gear Engineerings、Frontier Pro Services、Northern power system、GasTOPS 等、相關技術文獻與規範如 IEC、GL、ISO 等相關現況與實際投入經驗來探討。依據美國 Frontier Pro Services 齒輪箱維修專家 Jack Wallace 研究得出，由於風力發電機齒輪箱結構及零組件複雜大型化，重量多達約 15 噸，齒輪箱殼體及主傳動軸均會變形，對齒輪箱軸承及軸調心有負面影響；同時風力發電機齒輪箱安裝固著相關介面結構，亦會有變形負面結構，將會引起過大振動進而造成齒輪箱諸多故障。風力發電機齒輪箱故障問題，主要系由於未確保潤滑油合理過濾功能、未定期更換潤滑油、運轉環境惡劣、無移除潤滑油中金屬雜物、未適當控制合理負載、無適當齒輪箱冷卻功能、未更換已氧化潤滑油、未排除齒輪箱漏油、未監控齒輪箱噪音品質、未定期潤滑油抽樣檢查與無異常追蹤改善處理等所引起。

一般風力發電機齒輪箱故障，其故障原因複雜，不會只有單一原因；通常齒輪箱運轉狀況，大都由監控機制(含潤滑油質、潤滑油及軸承溫度、轉速、振動及噪音與現場目視齒輪齒印、外觀等) 維修體系所掌控,即可據以分析故障原因。在一良好風力發電機齒輪箱設計下,依 Northern power system 公司及 GasTOPS 公司研究,最先發生初期失效,通常是潤滑油質與軸承,然後再逐步影響齒輪損壞而最終導致齒輪箱故障。

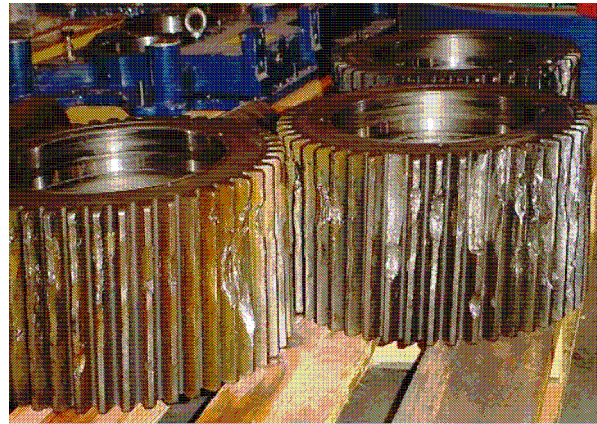
依據 Gear engineering 公司 Don McVittie 統計,風力機齒輪箱在新機安裝後 5 年內,超過 15%軸承將會出現失效,失效主要發生在高速軸軸承、行星齒輪軸承表面瑕疵(如圖五)與中間傳動軸定位軸承安裝失效,較不會發生失效軸承為行星托架軸承、空心軸軸承與非定位軸承;齒輪失效方面,失效主要發生在齒面折斷、齒輪點蝕損壞、齒輪蔓延性磨損等;齒輪製造瑕疵,則主要為輪磨回火、材質熱處理與其他品質缺失等。另依據 GasTOPS 公司 Richard Dupuis 統計,圖六與圖七為常見風力機齒輪箱損壞情形。



圖五 風力機齒輪箱行星軸承表面瑕疵示意圖

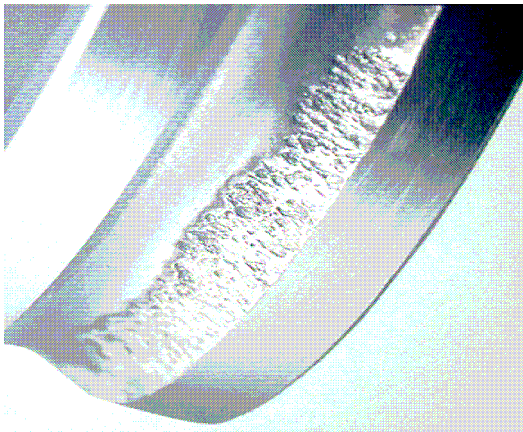


(a) 行星軸承損壞

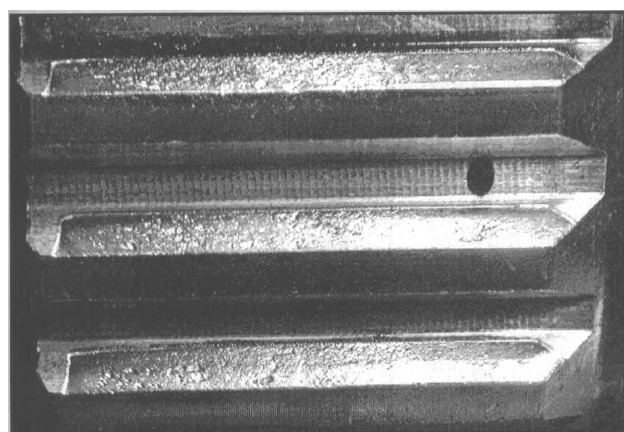


(b) 行星齒輪損壞

圖六 風力機齒輪箱行星軸承與齒輪損壞(Planetary Stage Failures)示意圖



(a) 軸承破壞性損壞



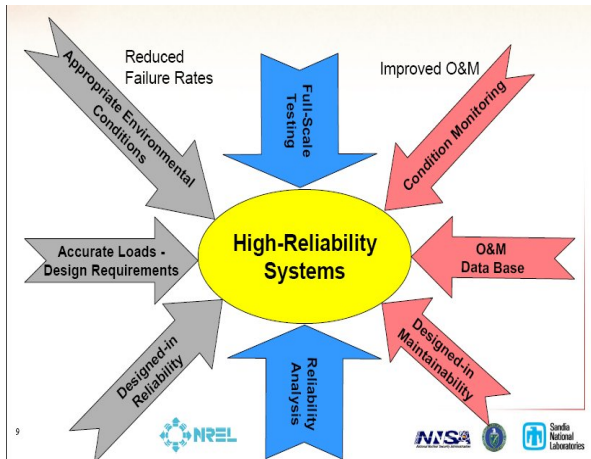
(b) 齒輪初期點蝕損壞

圖七 風力機齒輪箱軸承破壞性與齒輪初期點蝕損壞示意圖

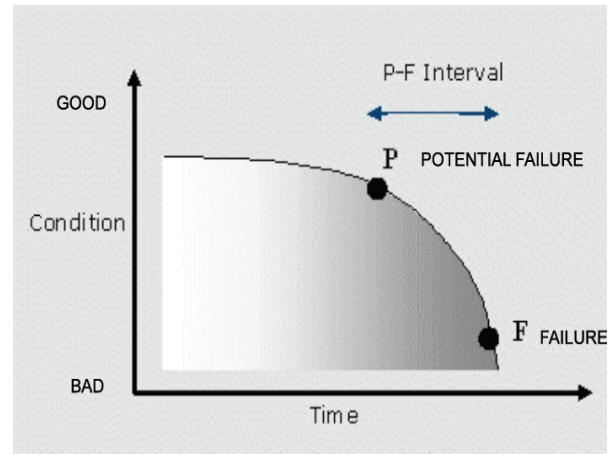
全球風力機齒輪箱維修趨勢

依據 Roger Hill 研究，風力發電機可靠度必須由減少失效率及改善運轉與維護來達成(如圖八)；風力發電機齒輪箱維修亦須依此方向來推展。改善運轉與維護方面，則著重於維修設計、建置 O&M 資料庫、監控、全載測試、可靠度分析等。

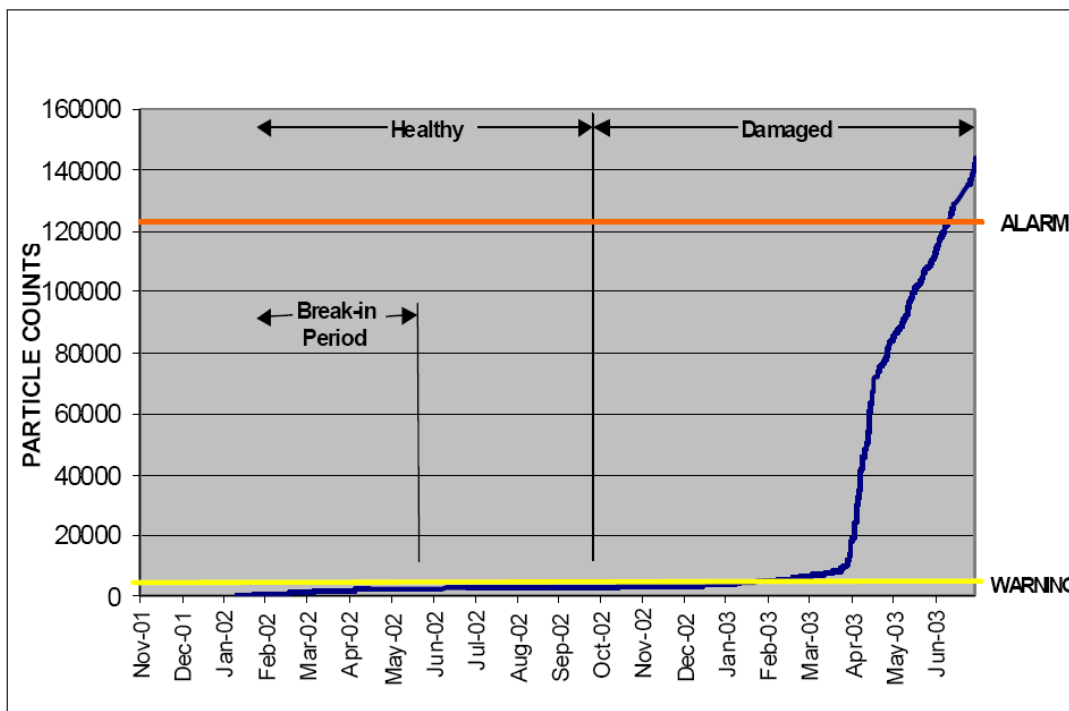
預防監控維修是重要且為未來全球風力發電機齒輪箱維修趨勢。依 GasTOPS 公司 Richard Dupuis 研究，風力發電機齒輪箱損壞可分為潛伏失效與破壞失效(如圖九)；分為初期破壞期、健康期與損壞期。當損壞達初期破壞期為注意狀況；當損壞繼續擴大達預警狀況、仍在健康期可接受範圍但需準備維修；如不理睬，損壞將繼續擴大達警告狀況；如再不理睬，損壞將繼續擴大造成破壞性失效(如圖十)。



圖八 風力發電機齒輪箱可靠度示意圖



圖九 風力發電機齒輪箱潛伏與破壞失效示意圖

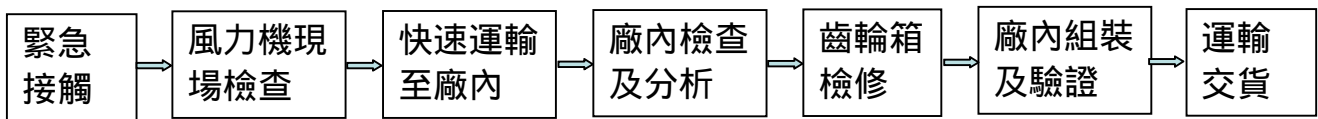


Case Study Damage Progression

圖十 風力發電機齒輪箱潛伏與破壞失效示意圖

目前在實際檢修風力發電機齒輪箱方面如Stork公司，其檢修程序依序為緊急接觸、風力機現場檢查、快速運輸至廠內、廠內檢查及分析、齒輪箱檢修、廠內組裝及驗證及運輸交貨，其流程圖如圖十一所示；齒輪箱維修方面為採用振動監控、潤滑油油質監控及外觀檢視；一般監控資訊包含振動、主傳動軸偏移、軸承與潤滑油溫度、潤滑油壓力、潤滑油油位、潤滑油油質、主傳動軸轉速、傳動功率、噪音及傳動扭力；實際齒輪箱故障則有齒輪損壞(如溶著損壞、蔓延性磨損等)、軸承損壞(如保持器龜裂、內外環損壞等)、軸心偏差、零組件鬆脫、不平衡及共振等。

圖十一 風力發電機齒輪箱檢修程序流程圖



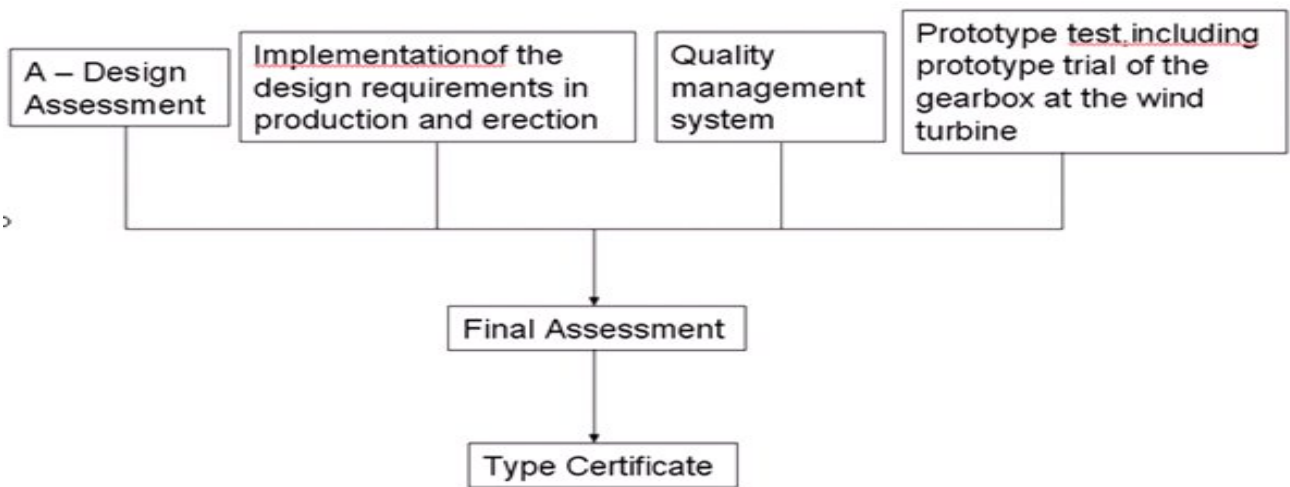
資料來源：Stork Gears & Services

風力機齒輪箱測試驗證

風力發電機齒輪箱的驗證，是非常重要的。國際標準規範 IEC 對風力發電機已訂定完整的驗證規範，在歐美市場等大多數地區，如無法通過國際標準規範 IEC 所規定的驗證規範，其風力發電機是無法販賣的。

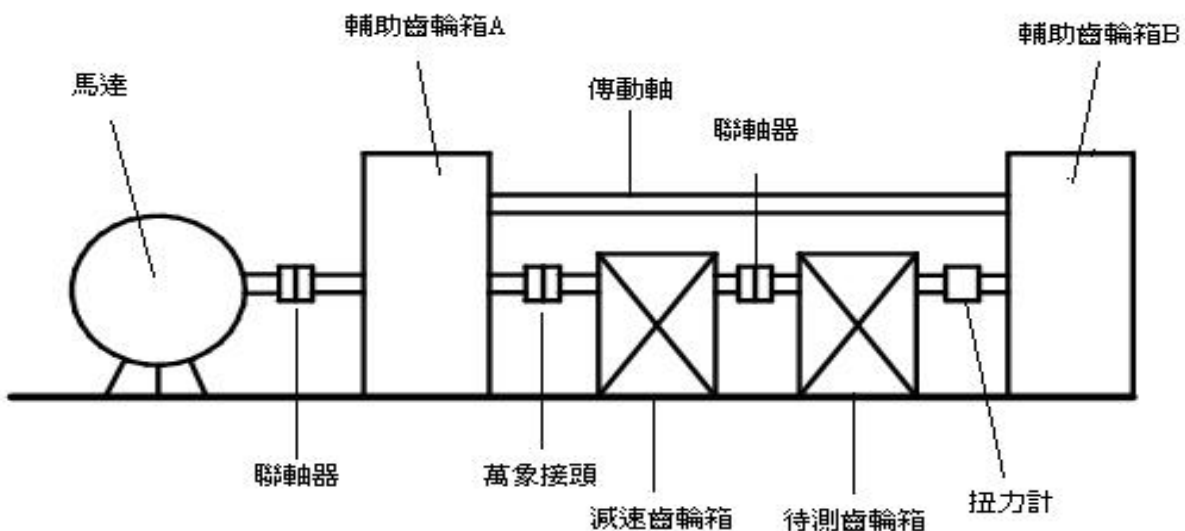
風力發電機增速齒輪箱的驗證，乃需與風力發電機驗證搭配。風力發電機的驗證前，須先建置好風力發電機的設計評估、品質管理制度、生產中達成設計需求機制及增速齒輪箱的開發測試，然後再進行最後的評估，之後才進行風力發電機的类型認證。其流程架構如圖十二。

由上述可知風力發電機增速齒輪箱的測試與驗證，是風力發電機認證的必要要件；而風力發電機的設計評估，又需建置一測試台來進行增速齒輪箱的開發測試。所以，風力發電機增速齒輪箱的測試與驗證，是需建置一測試台來進行其測試與驗證的如圖十三。



資料來源：Guideline for the certification of wind turbines, edition 2003

圖十二風力發電機齒輪箱型式驗證流程圖



圖十三 風力發電機齒輪箱封閉式 Back to Back 機械式測試系統圖

風力發電機齒輪箱檢修後測試與驗證，目前各齒輪箱專業維修廠驗收規範標準不一，通常依齒輪箱故障情形及要求修復協議規格報價進行檢修與測試驗證，IEC 亦無另訂定相關標準。

結論

風力發電機為長壽命的產品，齒輪箱為風力發電機中重要之動力元件，在較高容量大型風力發電機，大多需配置齒輪箱，齒輪箱維修不易，其需要有非常高的可靠度設計與維運建置，

其維修技術更是相當重要的一環。

透過建置完整風力發電機齒輪箱維運技術，可驗證齒輪箱由規劃、分析、設計、製造、組裝及實際運轉相關優缺點，進而建立完整具競爭力的風力機齒輪箱技術；同時，風力發電機齒輪箱的維運成功，也將提升整體風力機的可用率進而提高發電效益。

建置風力發電機齒輪箱良好維運功能，則需包含齒輪箱設計、維運環境、風場負載、維修體系、齒輪箱製作與組裝品質、維修設計、Q&M 資料庫、監控及可靠度分析等的有效整合；尤其更應確保潤滑油合理過濾功能、定期更換潤滑油、合理運轉環境、移除潤滑油中金屬雜物、適當控制合理負載、適當齒輪箱冷卻功能、更換已氧化潤滑油、排除齒輪箱漏油、合理監控齒輪箱噪音品質、定期潤滑油抽樣檢查與異常追蹤改善處理等的有效執行。

可預先預警有效提高可靠度之預防監控維修技術如潤滑油油質、振動、主傳動軸偏移、軸承與潤滑油溫度、潤滑油壓力、潤滑油油位、主傳動軸轉速、傳動功率、噪音及傳動扭力等監控與有效整合回饋改善，是目前及未來相當重要的維修技術課題。

參考資料

- [1] ANSI/AGMA/AWEA 6006-A03, Wind turbine generator systems – part4 Gearboxes for turbines from 40 Kw to 2 MW and larger,2004.
- [2] Roger Hill, Wind Turbine Reliability, cwec.ucdavis.edu/forum2006/proceedings/Hill_CWEC2006.pdf -
- [3] Jack Wallace, [Improving wind turbine gearbox reliability with O&M](http://www.renewableenergyfocus.com/.../improving-wind-turbine-gearbox-reliability-with-om/) , 2009. 2006.
- [4] Northern power system, The gearbox problem, 2009. www.northernpower.com/pdf/the-gearbox-problem.pdf
- [5] Richard Dupuis, Oil Debris Monitoring for Mitigating Revenue and Cost Risks Associated with Gearbox Unreliability, 2008. www.cpconference.ca/.../1830_Oil_Debris_Monitoring_for_Mitigating_Revenue_and_Cost_Risks_Associated_with_Gearbox_Unreliability.pdf
- [6] Walt Musial, Sandy Butterfield, Brian McNiff, [Improving wind turbine gearbox reliability.](http://www.nrel.gov/wind/pdfs/41548.pdf) www.nrel.gov/wind/pdfs/41548.pdf
- [7] Robert Errichello, Jane Muller, Oil cleanliness in wind turbine gearboxes. [1256143404_oil_cleanliness_in_wind_turbine_gearboxes.pdf](http://www.nrel.gov/wind/pdfs/1256143404_oil_cleanliness_in_wind_turbine_gearboxes.pdf)
- [8] Azima Dli, Cstudy wind turbine gear report- wind turbine gearbox save, 2009. [cstudy_wind_turbine_gear_repair_report-Wind Turbine Gearbox Save.pdf](http://www.cstudy.com/cstudy_wind_turbine_gear_repair_report-Wind_Turbine_Gearbox_Save.pdf)
- [9] Marta Molinas, gearbox-Survey of problems encountered in gearboxes of wind generation systems. www.elkraft.ntnu.no/smola2005/FinalExamination.../gearbox.pdf
- [10] KHK, Paradigm of gears failure analysis.
- [11] KHK, 齒輪的損壞及分析.

- [12] Don McVittie, Wind Turbine Gearbox Reliability.
www.sandia.gov/wind/2006reliability/tuesday/14-brianmcniff.pdf
- [13] Germanischer Lloyd, Guideline for the certification of wind turbine,2003.
- [14] Stork, Winergy, Grenna, GBS, SB, Wind turbine gearbox services.
- [15] ISO 81400-4, Wind turbine generator systems – part4 Gearboxes for turbines from 40 Kw to 2 MW and larger,2005.