

# 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：赴英國進修新興與再生能源

頁數 45 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

徐文科/台電公司/新能源施工處/八等機械工程專員/04-26580151

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：95.12.30~97.09.17 出國地區：英國

報告日期：97.11.13

分類號/目

關鍵詞：風力發電機、容量因數、Drive Train

內容摘要：(二百至三百字)

- 一、進修計畫緣由及目的。
- 二、介紹出國前準備、行程介紹、學校及課程簡介。
- 三、赴英進修研習心得。
- 四、在英國期間遭遇之困難及獲得的協助。
- 五、論文題目：Measurements on a Wind Turbine Condition Monitoring Test Rig--  
本論文主要之研究目的是在於提升風力發電機之容量因數 (Capacity Factor)，特別是針對大型離岸風力發電機。本專案藉由深入探討各式市場現有風力發電機設計形式以及分析其常見故障形式，定義出 Long MTTR Items 為風力發電機之 Drive Train System。以分析此系統的資料來提升相關構件的可靠度、減低所需維修時間、並藉由了解 Drive Train 機械動態特性，藉由分析傳動軸之扭力訊號來提供早期故障診斷之分析。
- 六、建議事項。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (http :

//open.nat.gov.tw/reportwork)

出國報告(出國類別：進修)

出國報告(出國類別：進修)

## 赴英國進修新興與再生能源

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：徐文科 八等機械工程專員

派赴國家：英 國

出國期間：95 年 12 月 30 日~97 年 09 月 17 日

報告日期：97 年 11 月 13 日

## 目 錄

壹、	計畫緣由及目的	P2
貳、	出國行程概述	P3
參、	研習心得	P4
肆、	出國期間遭遇之困難及獲得的協助	P10
伍、	論文題目： Measurements on a Wind Turbir	P12
	Condition Monitoring Test Rig	
1、	序論	P13
2、	文獻探討	P19
3、	物理特性	P25
4、	試驗及 Matlab 模擬	P28
5、	結果與討論	P30
6、	結論	P40
7、	參考文獻	P41
陸、	建議事項	P43

## 壹、計畫緣由及目的

電力與每個人生活息息相關，更是生活不可或缺的一大重要部份，然而在全球有限自然資源下、台灣特殊地理環境下以及永續發展的條件下，豐富多元電力設施發展及選用低污染性、永續性的能源，將會是國家的責任也是本公司重要工作項目之一。因此為了提升台灣人民的用電品質、提昇本公司企業形象、促進國家整體之經濟發展以及降低化石燃料的依存度，台灣電力公司從設立再生能源方面同時著手，積極努力推動「風力發電計畫及其他再生能源(含太陽能光電)計畫」。因應本處未來業務需要，選派人員參與出國留學甄選作業。

本人於 95 年參加公司「菁英留學計畫」出國進修人員甄選，該年度本公司共選派 10 人，本人在單位主管與相關人員的支持下，很幸運通過徵選，獲得公司資助出國進修之機會，後申請赴英國杜倫大學(Durham University)進修新興與再生能源碩士學位。本次出國案件係應用 95 年度出國計畫第 284 號，出國核定書-電人字第 9512-0400 號函。在執行設置發電設施工程工作經驗中，深深體會工程推動過程中經常遭遇不同之阻礙及困難，這些難題會隨著計畫的不同而有所差異，就連工程本身也會隨著周遭自然與人文環境而有所調整，唯有相關原理不會有所變動，因此為獲取日後執行再生能源工程設置之基本架構與深入了解再生能源相關原理與應用，除了修習相關課程外，並以此為研究基礎進行專案研究，選定指導教授 Pro. Peter Tavner，與其討論後訂出以「Measurements on a Wind Turbine Condition Monitoring Test Rig」作為本人之碩士論文題目。

## 貳、出國行程概述

時 間	地 點	工作概要
95年12月30日~12月31日	桃園國際機場→阿姆斯特丹→ 紐卡所 Newcastle 國際機場 →杜倫市	去程 (台北→紐卡所→杜倫)
95年12月31日~ 97年9月15日	英國杜倫大學	攻讀興新與再生能源 碩士學位
97年9月16日~9月17日	杜倫市→紐卡所→倫敦 Heathrow 國際機場→桃園國際 機場	回程 (杜倫→倫敦→台北)

## 參、研習心得

出國留學一直以來對我而言是個遙不可及的夢想，當自己還是學生的時期時已有初步了解出國唸書所需的費用，不是自己或家人所能負擔得起的，再加上進入公司服務後就連騰出出國旅遊的時機已是少之又少，何況是常駐國外念書；再者出國進修時，語文能力不僅是學習的要素更是生活上溝通的基本工具，雖然過往學生時期，英文似乎都能通過學校要求，但對於自己的英文能力是否足夠勝任赴國外念書與生活存有極大的質疑。然而，在主管告之下獲知公司有一「菁英留學計畫」，將選派人員資助其出國進修，並詢問個人意願，當下，心想若能通過甄選爭取到這個機會的話，個人曾有過的夢想就不會再是個遙不可及的夢。感謝主管的推薦，甄選過程中很幸運地通過了公司 95 年度的「菁英留學計畫」徵選作業，在接獲錄取通知後，首先必須趕緊通過公司出國規定之相關語言考試，接著學校申請及進行出國的所有準備。幾經考量後，選定了在英國對於再生能源工程方面相當有學術聲望的杜倫大學，並於 95 年年底出發前往就讀。



圖 1、杜倫大學校園一隅(Castle college)

杜倫大學(Durham University)為英國歷史悠久之傳統優秀大學之一。杜倫大學創立於 1932 年，類屬於英國傑出研究型大學，除了名列世界前一百大大學外，並自成立以來皆被評定為英國前十名大學，且在 2005-2006 年度被評選為英國年度大學，教學及研究品質一直都獲得極高之評價。另外本校圖書館名列全球主要圖書館名冊中，圖書館設立於科學場所(Science Site)的一個獲獎大樓內。它擁有人文、科學和社會科學(法律、音樂和教育另收納於其他館址)，圖書館的所有藏書，計有一百多萬冊印刷品和 3200 種期刊。相關研究領域廣泛包含有：生物、心理學、教育、工程、商學、建築、語言、財物管理、人力資源、銀行、法律、歷史、哲學、社工及女性研究等。

本校所在地 Durham(杜倫市)，是英格蘭北部重要的城市之一，也是英格蘭北方屏障要鎮。過往歷史中每當英格蘭與蘇格蘭的邊界受到兇猛的凱爾特鬥士頻繁入侵時，杜倫城就成為百姓躲避戰禍的主要避難地。今天，杜倫市依舊矗立於戰略要塞-Wear 河急轉彎處的一個半島之上，而戰時的指揮中心-大教堂與城堡建物依然彼此相望，歷史的洗鍊使杜倫成為北方風景最為美麗的城市之一，而城堡本身目前由學校管理也是學校最古老的學院，仍提供學生在此住宿。另外與城堡相對矗立的建築物是古老的杜倫大教堂是杜倫市的建築中心，大學城很多建物設施，現在也因此被指定為世界級遺址。



圖 2、杜倫市區景致

在杜倫大學進修新興與再生能源碩士學位期間，本人論文之指導教授-工程學院院長-Pro. Peter Tavner，其在英國及國際上之學術界與業界享有相當高之名望。而在其指導與規劃下，本人在杜倫大學修讀之科目計有：

再生能源基礎課程：New and Renewable Energy Fundamentals

課程大綱：Power System Plant: Cables, overhead lines, Transformers, Switchgear、Insulation、Induction Generator/Synchronous Generator Fundamentals

進階工程設計：Advanced Engineering Design

課程大綱：Design fundamentals、Embodiment design、Design planning、Product design、Design evaluation、Product management、Conceptual design、Modelling & prototyping

再生能源與環境：Renewable Energy and the Environment

課程大綱：Energy Use, Conventional energy sources、Renewable Energy Resources、UK and International energy policy、



Wind/PV/Biomass/Solar thermal/Wave/Tidal fundamentals、  
Industry lectures on key aspects of the renewable energy  
Industry、Project management techniques

能源傳遞與網路整合：Energy Delivery and Network Integration

課程大綱：Network Integration、Transmission & Distribution Systems、  
Power Flow、Embedded Generation、Offshore Networks、  
Electrical Network Faults Flexible AC Transmission Systems

發電與轉換：Energy Generation and Conversion Technologies

課程大綱：Induction Generators、Doubly Fed Induction Generators、  
Synchronous Generators、Permanent Magnet Generators、Linear  
Machines、Low Speed Machines、Variable Speed Machines、Power  
Electronics、Energy Storage

熱與機械能源轉換系統：Thermo-Mechanical Energy Conversion Systems

課程大綱：Solar、Biomass、Hydrogen and Waste Thermal Energy Resources、  
Hydrogen Technology and Fuel Cells

能在職場服務一段時日後，重拾書本，再當個全職學生實屬不易，更何況是在一個完全陌生的文化體系下，連語言也不同的環境，實在是一大挑戰，班上共有 10 個學生，僅有我跟另外一位來自尼泊爾同學屬於非英語系亞洲國家，其他同學以英國及歐洲學生為主，再加上雖然英國是英語的發源地，但是在台灣較為通行的卻是美式英語，造成剛開學時在生活上與上課的過程中，常常因此造成語文上的壓力。由於本所的課程在規劃以電機背景為主，也因為課程在這類的安排下，讓我豐富了個人本職學能，另外一方面也加添了學習壓力，還好修課過程中，除了充分利用上課時間好專心聽講外，也在課餘後充份與同學討論，學期最後在成績上也獲得相對回報。論文在指導教授的指導下以及同實驗室的人員幫助下，從實驗模式建立、數據取得以及最後分析，一步步辛苦的完成專案研究。在這段修課與執行專案的過程

中，開拓了自己無限的視野，這是兩年放洋留學生活中，除了獲得學位外最大的收穫。



圖 3、與指導教授及班級同學合影

一年八個月的英國留學生活可說是多采多姿、酸甜苦辣。其中，離家在外要面對異鄉的孤寂、以及英國自認紳士的冷淡文化，對於英國人辦事效率之低，更是有深切之體認，或許這是英國民族特性小心保守所致吧；幸運地，出國在外這段時間讓我交到了來自世界各地的知心好友外，另外家庭成員中也加添了小寶貝—郁棠；相對地，必須面對全是英文的期末考試以及論文定稿寫作的壓力；加上體驗到東、西方人的不同觀念以及英國酒吧與足球文化都對我有相當大的影響；所幸面對的困難與挑戰都能逐一克服，論文也在長期煎熬下順利完成，很高興自己能在這段時日內，不僅僅是拿到了學位、吸收了新知，也體驗到了西方人面對任何事的認真與執著的態度與不同的思考模式。



圖 4、杜倫著名景點之一——杜倫大教堂

## 肆、出國期間遭遇之困難及獲得的協助

在前往英國留學前，對英國的認識僅是透過媒體報導之皇室、足球文化與科技外，可真是寥寥無幾，對於自己要前往的國家-英國，心感陌生與期待，因此在出發到英國留學前有莫名興奮與緊張，出國過程除了飛機航程耗時外，其餘大致順利。到了學校，首先必須要克服的就是七、八個時區差別的時差問題，台灣與英國間，在夏天期間有7個小時時差，而冬天因進行日光節約時間調整則是8小時，慶幸的是到達後並非立即開始上課，還有幾天的時日可以進行自我調整，在這段調整生理時鐘的時段，最難適應的該是英國冬天超級短的日照時間，自小一貫遵循日出而作日落而息的我，並無法立即適應這高緯度的北國，早上九點多日出以及下午四點多日落的生活，讓我花了不少時日才真正適應了英國的生活起居作息。

到了新環境首先就是要安頓自己食、衣、住、行的民生問題，並且要儘快熟悉環境，第一天是在傍晚時間到達英國不過此時的英國已是夜幕低垂，到達宿舍卸下沉重的行李再稍做休息後早已飢腸轆轆，還好室友帶我前去 TESCO 買食物與簡單的日常用品，用畢簡便晚餐後早早入睡，這就過了我第一天的英國生活，在此值得一提的是，出外靠朋友這句話的確是千真萬確，除了室友之外，我必須要感謝杜倫大學台灣同學會的幫忙，有了他們的指引與幫助讓我很快速的銜接上英國的生活。

另外在此想跟大家分享一下，英國開立銀行帳戶的情況，開戶這動作在台灣或許近期還需要拍拍照片花點時間，可是在英國它可是耗時甚多，而且費了好一番功夫，因為國際學生身分關係並非英國國民，在開戶之前需學校協助開立證明才能申請銀行戶頭，在附上證明文件後，還要填報一堆申請表及文件給銀行，想說可以立即能取得帳戶，但這邊的作業程序與台灣的完全不同，光是審核就足足花了三個禮拜左右，為了維持基本開銷及房租等等費用，第一個月在英國生活的日子，身懷鉅

款，這些差異真是讓我花了好一段時間才適應英國保守小心的辦事態度，此部分一直無法讓我認同，因為一個先進的國家為何處理事情的效率一直讓我無法認同。

物價是在英國生活所必面對的最大難題，英國的高物價是舉世聞名，單程公車到學校就要 1.5 鎊合台幣近 100 元，簡單一份三明治午餐約要 3~5 鎊，若是餐館中午便餐平均須花費 5~10 鎊，這部份還可以自己準備省點錢，但住宿費卻是無從減省，學校宿舍每月收費超過 400 鎊，這僅能租用小小一間房間，並需要跟其他五位同學共用廚房，用台幣換算後若在台中租房我可以整整租下一棟透天厝。慶幸有公司補助，不過經濟壓力還是不小，每天仍須努力的省吃儉用，節省開銷。異國留學生活不易，感謝那些在我遭遇大大小小的困難時，提供幫助的所有人，有了你們我才能克服種種困難，順利完成進修的任務取得學位，更豐富了個人的人生經歷。

## 伍、論文題目：Measurements on a Wind Turbine Condition Monitoring Test Rig

本論文主要之研究目的是在於提升風力發電機之容量因數(Capacity Factor)，特別是針對大型離岸風力發電機。本專案藉由深入探討各式市場現有風力發電機設計形式以及分析其常見故障形式，定義出 Long MTTR Items 為風力發電機之 Drive Train System。以分析此系統的資料來提升相關構件的可靠度、減低所需維修時間、並藉由了解 Drive Train 機械動態特性來提供早期故障診斷之分析，以作為選用機組及運轉維護之參考。

本論文共分為七章，各章之簡介如下：

第一章、序論。介紹說明目前市面上風力機組歷史、設計概念、趨勢以及離岸風力機的特性。

第二章、文獻探討。探討以往致力於提升容量因數的文獻，以風力發電機損壞形式、項目的平均修護時間、定義出研究主題 Drive Train 系統為研究目標。並以研究分析此類資料來提供故障預知訊息，進行提升離岸風力機容量因素。

第三章、物理特性。風力機故障檢知測試台之詳細尺寸及使用試驗台的原因、測試台的機械參數。

第四章、測試與模擬。主要為討論本論文之研究方式，。

第五章、結果及討論。

第六章、結論。

第七章、參考文獻

以下為本論文內容重點敘述：

## 1、序論

在化石燃料短缺情形發生後，導致再生能源變成了開發主要的核心能源；另一方面使用化石燃料的汙染特性也再次促使各國致力於發展乾淨、低成本、永續的再生能源。在京都議定書生效之後，能源的進化也將其焦點聚焦於再生能源，特別是其中較為成熟風力發電。

此項技術應用被稱作風能換系統(Wind Energy Conversion System-WECS)或風力發電機(Wind Turbine)。就現有再生能源技術而言，風力發電是發展最快也最具經濟效益的技術，目前除了應用在岸上廠址外，也正被考量應用在風能較大的離岸廠址。

以下將就簡述離岸風力機的特性以及風力機歷史、設計趨勢及特性作為開端，然後介紹離岸風能的資源及離岸風力機的特性。

### ● 離岸風力發電機

目前風力發電機正被大量、廣泛安裝與運轉在全世界岸上廠址，並且經由實證驗證了風力發電機額定容量高達 3~5MW 的可行性。而目前離岸風力機被定義為那些被安裝在離岸邊 30 公里以內及水深少於 40 公尺的風力發電機，然而，最近更深的水域也陸續被考量為設置風力發電機的廠址。以下幾點為風力發電機往離岸發展的主要原因：首先離岸處風能較大，理論上，相對風速增加 10%，風機輸出可以增加 30%；再者離岸廠址其風較為均勻且較少亂流，此部份可增加發電量並減少風力發電機本身起停之負擔；最後，岸上廠址已開發飽和，要找其他合適廠址並不容易。

### ● 風力發電機之歷史與概念

應用風力替人類做工可追溯至 4 千年以前左右，而依文獻記載第一座應用風能來發電的機組是在西元 1881 年。然而，風力發電第一次被重視及廣泛應用是在 1973 年能源危機的時候，多數的政府以獎勵政策的方式來減低對高價及有限的能源的依存度，而這也促使美國在 1970 年代第一次大量安裝風力發電機，而這被稱為加州風力發電機熱潮。風力發電機第二次安裝熱潮發生在於 1990 年代，因大多數的人憂心

化石燃料對環境造成嚴重的污染以及導致全球氣候變遷，而促使第二次大量安裝風力發電機。文獻報導在 2006 年年底時，全球風力發電設置容量已達 74.3GW，其中裝置容量以丹麥為首德國居次。而主要被安裝的風力發電機為水平軸式風力發電機 (Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT))，以下將簡述市面上存在的水平式風力發電機。

### 固定轉速風力發電機

定轉速風機被從 1920 年代開始安裝使用，其轉子運轉在一個固定轉速並經由變速箱帶動發電機發電，而在定轉速下運轉，變速箱的齒輪比以及發電機的設計參數必須依其連接電網的頻率來決定。此類風力發電機其容量大小 20kW-1MW，並配置有失速調整控制。而依發電機型式分類又可分為同步發電機及感應發電機（詳如圖 1.1）：

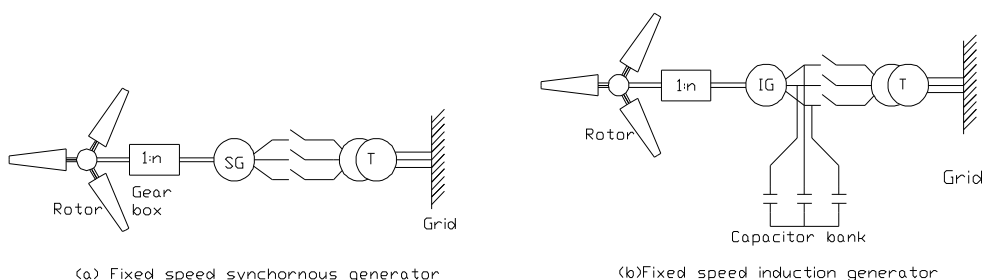


圖 1.1: Common fixed speed wind turbine configurations

實務上，定轉速風力發電機具有簡單、便宜、耐用即可靠性佳等優點；然而它主要缺點是偶合電網連結所產生之高機械應力。當電網系統暫態或風速變動時會導致發電機與齒輪箱之損壞，此現象特別是對高剛度電網連結定轉速同步發電機風機影響更大。

### 可變轉速風力發電機

近 20 年來，風力發電機主要型式為可變轉速風力發電機，其主要配置葉片旋角控制



系統及變轉速發電機等設施。這類風力發電機能在風機切入與額定風速之間以調整葉片角度來追蹤最大額定  $C_p$  值；當風速超過額定風速轉速時葉片旋角控制系統會調整葉片角度來限制能量輸出及保護機組安全。以下為不同可變轉速之風力發電機設計概念(詳圖 1-2)。

#### **永磁式可變轉速風力發電機 Variable speed wind turbine, Permanent magnet generator (PG)**

此類風機配置自激、高效率之永磁式發電機(詳圖 1-2 a)，另其配置全額定變壓器將發電機輸出之電壓及頻率調整與電網相同並與以連接，此變壓器另具有隔離故障電流以及對發電機之虛功輸出進行控制等功能。然而其配置之電壓源變壓器及永磁式發電機並非是標準化商品，其所需之花費之成本較高。

#### **感應式可變轉速風力發電機 Variable speed wind turbine, geared induction generator with a fully rated converter**

對高速度感應式發電機而言有許多優點不同於其他發電機，諸如：簡單、穩固、可靠度高以及價格便宜等。因此許多大型風力發電機配用經由變速箱提昇轉速來帶動之高速感應式發電機。相對地，此類型風機應用最大的缺點在於其需要磁化電流，因為感應式發電機本身不具有永久磁場，磁場需要藉由發電機側變壓器來提供激磁電流(如圖 1-2 b)，所以需要提供外部電源來建立磁場。另外如同永磁式發電一樣，這一類型風機應用需要配置一個高價的全額定容量的電網側變壓器。

#### **雙饋感應式可變轉速風力發電機 Variable speed wind turbine, doubly fed induction generator (DFIG)**

雙饋式感應發電機配置繞線式感應發電機，其定子繞線直接與固定頻率的電網連結，而轉子繞線線圈與一個部分額定的電壓源變壓器連結(如圖 1-2 c)，雙饋式是取決於發電轉子與靜子分別由電網及轉子側變壓器分別供給電源而來。此系統可在特定範圍限制下進行變轉速應用，這可變轉速範圍決定在於轉子側變壓器的容量大小，市面上產品通常允許其轉速變動在同步轉速的正負 30%範圍。就雙饋式發電機

而言，其具有優點如下：具有控制輸出之虛功與實功以及進行最大功率輸出的能力，另外其部分額定的變壓器其價格較低，相反的其缺點是需要更多複雜的控制系統及機構，諸如常會發生故障的滑環及變速箱等設備。然而就近代大型風力發電機而言，雙饋式發電機目前是市場主流，統計資料顯示 2002 年時，此型態發電機佔市場比率約為 46.8%。

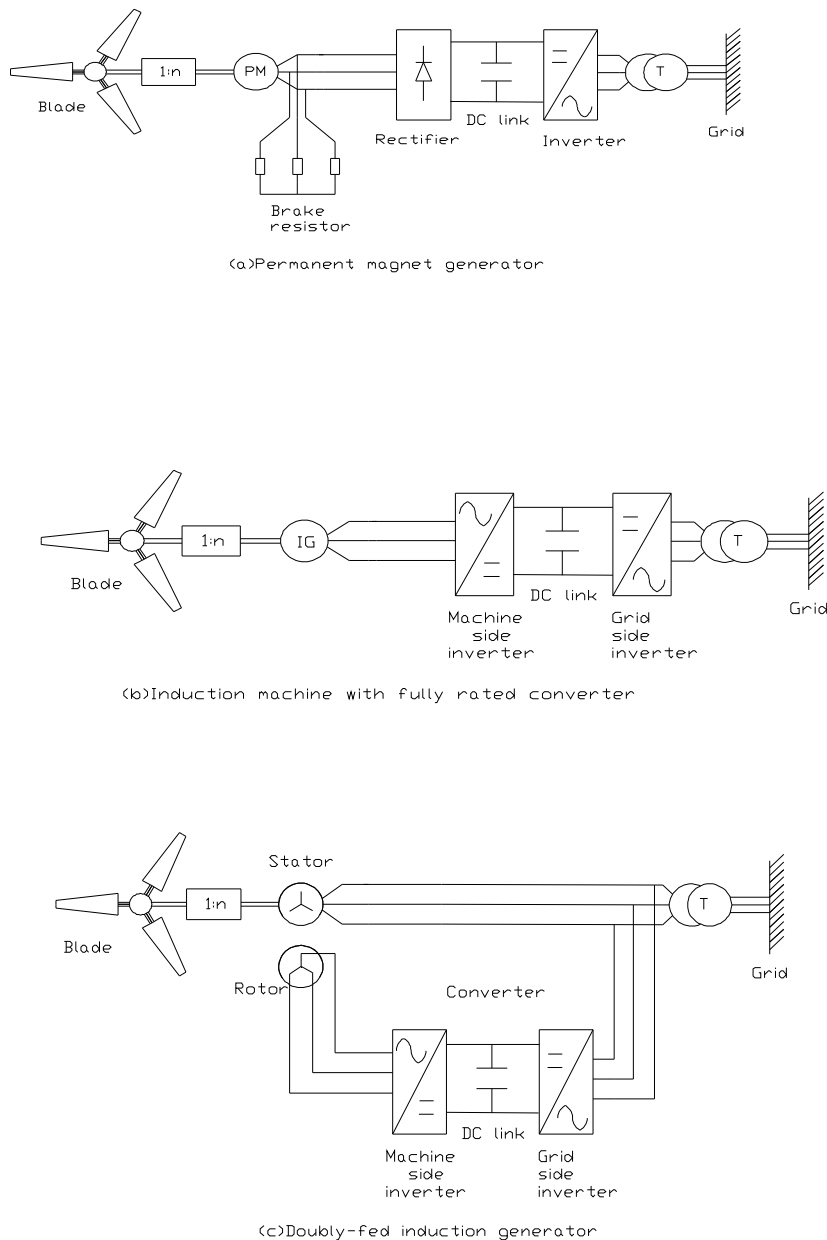


Figure 1.2: 常見可變轉速風力發電機配置

### 直驅式風力發電機

部份大型風力發電機設計上由轉子直接帶動發電機，省略了提昇轉速的變速箱，這樣的設計減少了機件，相對的減省了成本與機械之複雜性，進而也增加了機械本身之可靠性(其配置如圖 1-3)。這類型風力發電機通常使用一個龐大而且重量很大的多極式發電機，其發電機直接與風力機轉子連結並藉由一個全額定輸出的變壓器與電網連結。這類發電機之缺點在於必須使用非標準化產品且重量甚大的發電機，另外也需要配置一個價格高的全額定變壓器。

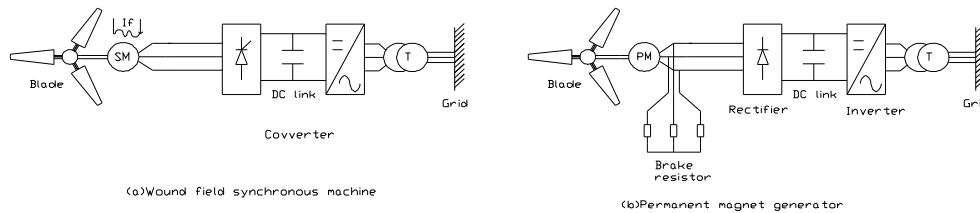


Figure 1.3: 直驅式風力發電機配置

### ● 風力發電機的趨勢

科技隨著時代進步，今日市面上被安裝使用的風力發電機形式主要有三種：丹麥概念三葉片風機、雙匏可變轉速風機以及直驅式可變轉速風機等。就這三者比較而言，第一類型為設備簡潔便宜，但常會有機械故障發生；次者，雙匏式發電機特性為其發電機較貴但比直驅式發電機簡單；對直趨式發電機而言其特性為龐大、安靜以及更具效率。

很多領域的科技都直接促使了風力發電機的進步，這些領域計有：材料科學、電腦科學、空氣動力學、數值分析方法以及電力電子等。儘管科技發展很快，現今，風力發電的技術仍有多值得加強改善來提升風力發電機發展，諸如：擷取或轉換低風速時的能源、降低風力發電機的單位能量設置成本、增加風機本身的壽命以及風機容量因數等。

## 離岸風力的潛能

風機設置於離岸區域除了有先前說明的優點之外還有以下優點：

- (1)設置議題：離岸設置的抗爭壓力比岸上的低，離岸區域空間廣闊將有助於大量開發。
- (2)具有較佳風能：離岸區域風速比岸上高且較少亂流。

舉例來說：歐洲的文獻報導，就距離海岸線 30 公里以內以及水深在 40 公尺以內，歐洲本身離岸風能共有 3028Twh/y。而其中就英國而言，比較其離岸風能以及其電力年用量來看，其離岸的風能大約是 2006 年全國消耗量的 3 倍左右。離岸風能具有很大的潛在能量，再者多數的國家陸域上的風場都已開發完畢，且海島國家皆致力於發展離岸風力來降低對能源的依存度以及減低二氧化碳的排放量。然而世界上離岸風能發展卻只是在起步初期，離岸風場必須面對許多較岸上嚴苛的自然條件，使得離岸風能開發較難，諸如較高的溼度與鹽度、較高溫或較低溫、暴風與雷電頻繁等這些都會增加風機設計需求。總得來說，離岸風機的設置成本以及維護運轉成本都較陸上風機來得高。然而，藉由增加離岸風力發電機的單機額定容量，可以有效的降低其基礎及其他設備的設置成本，這此情形下，離岸風力發電機的單位容量設置成本可以很明顯的減低，因此，近來的離岸風力發電機會朝大型及以單基座安裝發展。

囿於陸域與離岸場址的不同自然條件特性下，離岸風力發電機的應用上必須注意下列機械特性的調整：

- (1)機艙的保護能力
- (2)減少零件增加機組可靠度
- (3)選用抗腐蝕的材料

雖然就天候條件而言，離岸的環境似乎對風力發電機有著較陸域區域嚴苛的條件存在，然而，就離岸的自然條件特性也有對風機有正面效益的自然條件，諸如：離岸廠址位於海上，海平面本身表面粗糙度低，因此會有較低的亂流及風切影響，再者較經常穩定性的風速下，風機的起停次數較少，風機可以持續性的運轉，這會減低風機機件的疲勞傷害、延長風機的使用年限。因此在風機的設計與製造上，若能因應離岸風場操作特

性進行必要的修正，離岸風機的可靠度將可以有正面之提升；再者藉由收集與分析陸域上風力發電機運轉過程的資料，可以找出風機常見故障的模式，這些資訊也可以提供風機周邊供應商或製造商改善缺失，來提升其可靠度及延長風機運轉壽命。儘管如此，然而風機故障還是無法避免，因此致力於提升風力機的可用率(Availability)與容量因數(Capacity Factor)，將會是決定離岸風力是否能進入成熟期的主要決定因素。

## 2、文獻探討

離岸風力的可靠度必須如同其他一般發電設備一樣，另外其運作的簡單性、低設置與維護成本及故障率、以及更長的運轉壽命都將會決定離岸風機是否值得投入。就這些議題而言，風機設計業者、製造商以及學者已經花了許多工夫，本章節將對於近期對於提升風力發電機容量因數研究的文獻進行簡短描述。

- 風機的故障模式

風力發電機是個結合多領域科學應用的複雜產品，其中包含了空氣動力學、材料學、電機機械與控制等，然而就其故障模式可以簡略區分為：電子、控制及機械等三大領域(如圖 2-1)。

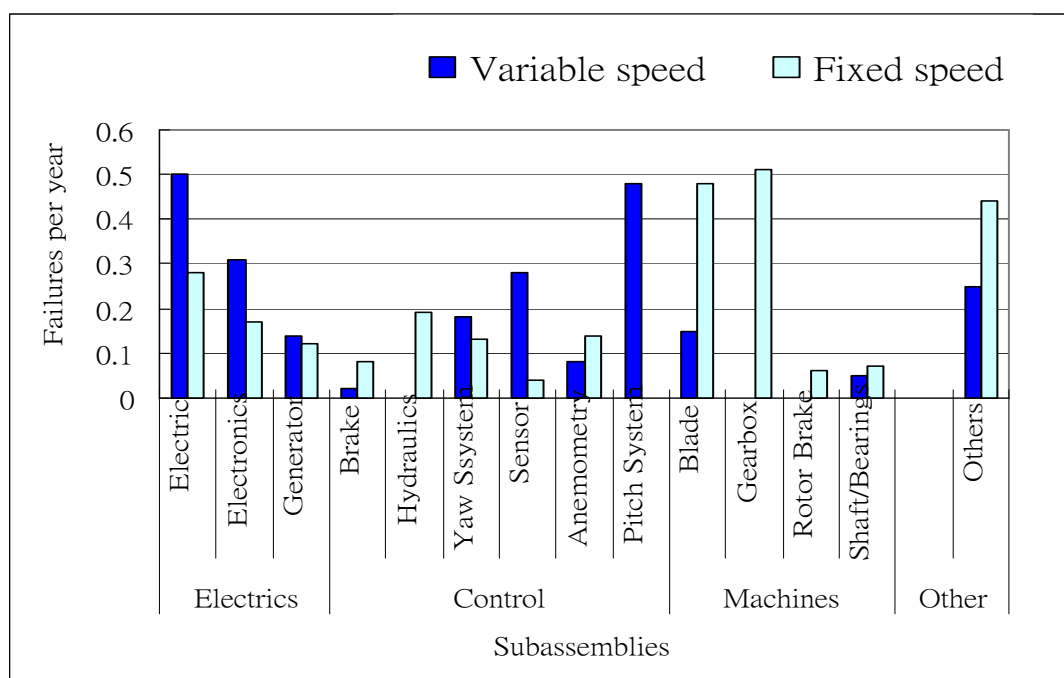


圖 2.1 風機不同型式的故障率取自 Tavner [9], averaged from 1994-2004

## 電子故障

如同圖 2-1 所示，電子故障主要包含電路、電子以及發電機等三部份，除了發電機(通常被歸類於傳動與統)電路與電子構件在風力機的應用上具有重量輕、體積小以及構件多等共同特性，再者這類產品其耐用性與可靠度都隨著時間而被製造商提升，另外離岸風機的機艙必須具備隔離鹽份與水份的能力，因此日後離岸風機的運作過程中，電子故障率有可能比原有陸域上的資料來得少。

## 控制故障

統計資料顯示有很多故障的項目與風力機的控制系統故障相關，其中最常見的故障出現在一般感應器及旋角控制等。風力機廣泛應用感測器作為控制風機運轉與監測用，這一類通常是微小的感測器，諸如 PT100、溫度、速度、位置感知器等。

## 機械故障

依據圖 2-1 可得知，機械故障部分主要原因有葉片、軸、軸承、變速箱、煞車及發電機。另外故障模式最常見的為電子控制系統。WindStats 統計研究中顯示定轉速與可變轉速風機的常見故障原因不同。就定轉速風機而言，其最常見的故障模式為此類風機與電網高剛性連結，因此當風速變動時衍生的暫態衝擊在葉片與變速箱，因而造成傳動系統構件的損壞；而就可變轉速風機來說，此類風機能在不同的風速狀態下，藉由旋角控制來進行最大風能輸出的操作模式，因此其較常見的故障原因都與旋角控制系統及電子元件相關。

### ● 平均修護時間

平均修護時間(Mean Time To Repair MTTR)可被定義為特定機件損壞時所需要的需護時間，通常 MTTR 會隨著故障模式及風機的可抵達性而有所不同。

## 破壞模式

很多電氣系統的損壞是來自於電線連接處的鬆脫或是接觸面的氧化等所致。這一些原因所造成的故障所需要的修護時間非常短，相同的，感測器通常具有輕薄短小

的特性，因此這兩類的故障會較容易消除。而就風力發電機現行的控制概況來看，控制系統目前都已程式化、電腦化或是晶片模組化，這一類造成的故障可以藉由再程式化或是更換晶片加以解決。然而相對來說，機械部分所引起的故障原因及其所需的修護時間就與上述原因所需的時間有所不同。再者隨著風力發電機額定容量的增加，機械元件的剛度與尺寸也隨之加大，更加添了修護有關風力發電機之葉片、變速箱、煞車系統及發電機等的困難度。Tavner 等人發表文章說明有關風機因為傳動系統所衍生的故障，將會對風力發電機的可用率產生很大之衝擊，因為這一類故障項目皆屬長平均修護時間項目。

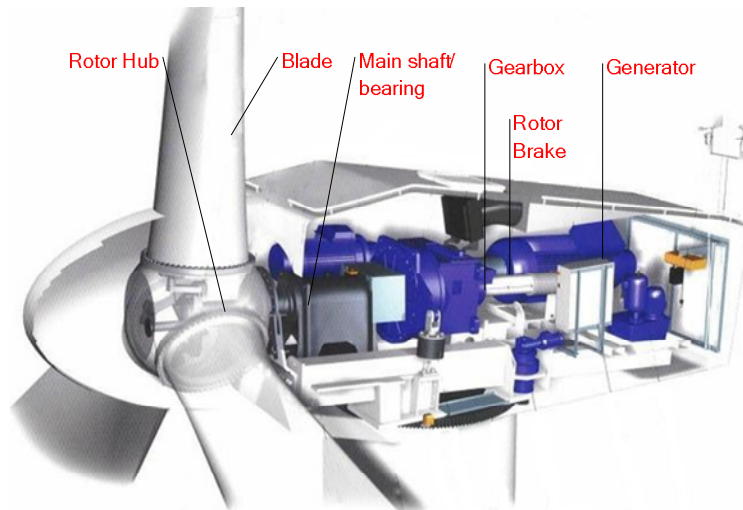
### 可抵達度

風機廠址的不同可抵達度大小將會影響到風機的可用率，進而影響到風機的容量因數。舉例來說，Harrison 等人報導風力發電機的運轉人員致力追求風力發電機可用率能達到 98%左右，但目前只是 80~90%之間。然而就天然條件而言，離岸廠址的可抵達度會比岸上廠址來的更低，所以當離岸風機故障時，會因為離岸廠址低的可抵達度，因而導致降低離岸風機之可用率及容量因數。

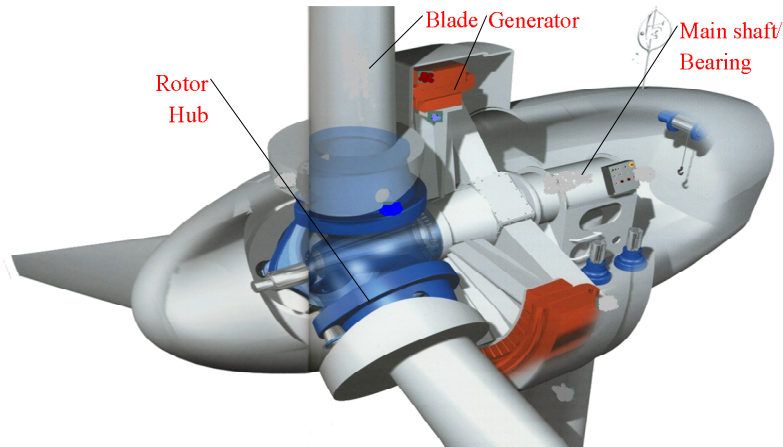
#### ● 風機的傳動系統

雖然擷取離岸廠址的風能之發展與應用目前仍在起步階段，然而離岸風力的潛能極大以及隨著風機容量的加大，在此先決條件，若能有效提升離岸風力發電機之容量因數，將會是決定離岸風力是否經濟可行的核心要素。如同前述，若能避免相關傳動系統中經常發生、嚴重性高以及需要長時間修護的項目之故障發生，將會明顯提升風力發電機的容量因數，這對於離岸風機因其廠址的可抵達性更低，而有更顯著之影響。

風力發電機之傳動系統可被定義為：風力機內相關用於傳遞扭力來進行發電的機件，傳動機件包含葉片、主軸、軸承、變速箱、轉子煞車及發電機等，詳如圖 2.2。



(a) A typical Indirect-drive turbine drive train (Source: Vestas)



(b) A typical direct-drive turbine drive train (Source: Enercon)

圖 2.2 Two different drive train systems of typical wind turbines

Tavner 等人提出分析風機運轉資料報告，此報告係分析 1994-2004 年五種不同風機所得，本報告顯示風力機大部分故障原因與傳動機件相關詳如圖 2.3。



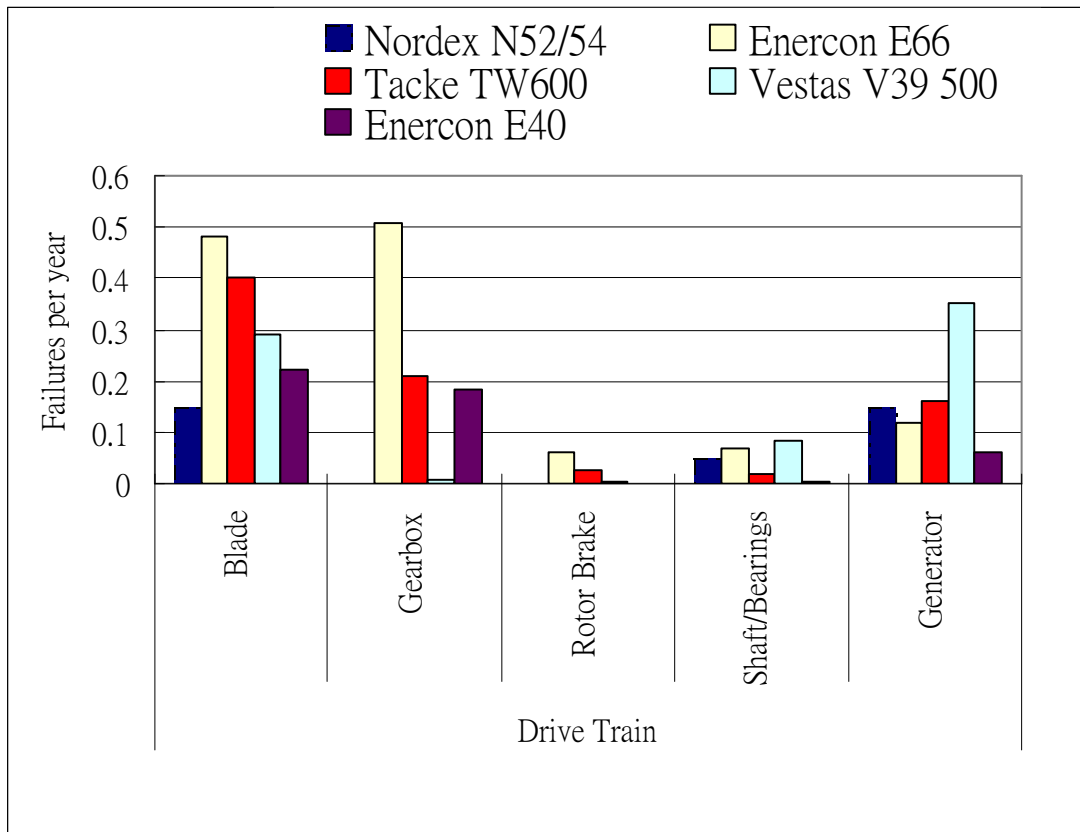


圖 2.3 Drive train failure rate data taken from Tavner [9]

### 葉片

葉片是風機用來將風能轉換為扭力的元件，市面上大部分的風機皆配置三只強化玻璃纖維所製成的葉片。

### 主軸與軸承

主軸承是用來支撐軸與風力機傳動元件等的重量，以及用來吸收軸與葉片重量所產生之徑向力或風所造成之軸向力。

### 變速箱

變速箱適用在非直接傳動風機內，此乃用於轉換扭力於不同速度之傳動軸間，後帶動發電機發電。

### 發電機

發電機是用來將轉動的機械能轉化為電能的一個設施。

風機製造商以及研究人員執行有許多關於監測風力機傳動系統機械元件之研究來提升風力機容量因數，尤其是針對大型離岸風力機。然而這些研究都是使用特殊技

術來針對風力發電機特定元件進行監測分析，極少考量應用傳動系統上的扭力來進行傳動機件的全面監測。如 Dutton 等人提出之安裝壓電感知器於葉片內聲波訊號來監測有關葉片內部裂痕成長及纖維破損的現象。

另外歐洲從 2002 年來長期執行的一個相關風力發電機監測計畫-FP5 project CONMOW 由其執行結果中，成功的應用許多線上監測的技術於現行的風機上，發電機本身的偏心程度可藉由線上分析振動值來預知；藉由線上監測軸承振動振幅值也可以及早預知軸承的損壞。

而 Wiggelinkhuizen 等人也於年度成果中提出其他相關成功之線上監測技術：其主要應用風力發電機本身之 SCADA 所收集之資料，來對風力機機件進行線上監測，其中包含應用比對長期軸承之相對溫度，來對軸承磨損以及軸偏心等現象的及早預知；另外藉溫度趨勢的分析也可被成功應用到齒輪油品質及軸振動的監測案例。

以上所提之監測技術皆能有效及早對風力機傳動系統機件在發生劣化或損壞時的行為進行預知或檢知，然而分別對單一元件使用特殊方法其間所需要收集及處理的資料量將會對資料收集系統以及工程人員造成非常大之負擔。依風力機扭力傳送過程中，可知扭力會傳遞至傳動系統上所有相關元件，因此藉由獲取並分析傳動軸上的扭力，將有機會獲取整個傳動系統，包含葉片、發電機及變速箱等元件之行為特性。再者，就風機現有配置來看，傳動軸上低資料率的扭力訊息可從 SCADA 系統間接獲得。因此整體而言，藉由獲取傳動軸上的扭力訊號作為故障預知，對於提升離岸風機之容量因數將有助益，也會是最經濟與簡單的線上監測方式。Tavner 等人展示應用分析監測風力機軸上扭力訊號，能有效偵測到不同發電機線圈短路、發電機負載情況以及發電機不平衡現象等。然而，風力機的自然頻率與振幅響應，將會隨著傳動系同上的機件以及其機械性質改變而有所不同。因此藉由監看扭力訊號的自然頻率響應特性，將會有能力對機件狀況或故障現象採線上監測或及早預知作業。

風力發電機的單機的容量提升以及基礎設置成本的降低，致使風力發電機快速成長包含岸上於離岸風機的設置。然而就離岸風力機而言，如何有效持續運轉那些被

安裝在具有高風能但不易接近廠址離岸之風機，這將會決定離岸風機的開發使用是否會符合經濟效應的主要因素。為了促使風機能長期持續性運轉，需要藉由獲取更多風力機傳動系統的資料來增進其可靠度、減低運轉維護時間以及對故障現象及早告知，這些將都會對提升運轉中風力機的容量因數。

應用線上監測來獲知風力機潛在問題，並在問題發生前或損壞機組前，配合機組運轉排定維護時程，將可能損壞的元件先行修護更換，這也將對提升風力發電機容量因數有極大助益。因此從技術面、運轉角度及經濟面來看，藉由監測風力發電機傳動軸上的扭力訊號來監測傳動軸狀態並做故障預知，將會是離岸風機應用與運轉十分重要的議題。

本篇研究目的在於應用分析傳動軸扭力訊號，作為提升風力機容量因數之可行性探討。

### 3、物理特性

風力機試驗台的目的是在經濟與可控制環境下，作為研究線上監測風力發電機的運轉特性所需。

#### ● 風力發電試驗台

用真實的風力發電機作為線上監測研究，可能衍生之問題可藉由使用試驗機予以解決，而其中使用試驗機的目的如下：

- (1)解決離岸風力發電機之低可抵達度
- (2)提升資料品質
- (3)解決惡化電網品質或損壞風機之可能性

綜合以上可知使用試驗台作為研究工具，將會較使用全尺寸風力機來的可靠、經濟、可控制及更經濟等。然而，用試驗台來全面展現風力機特性將會是十分複雜的問題，所以在配合研究目的下，必須在迎合研究需求將試驗機簡化，試驗機詳細特性如圖 3.1。

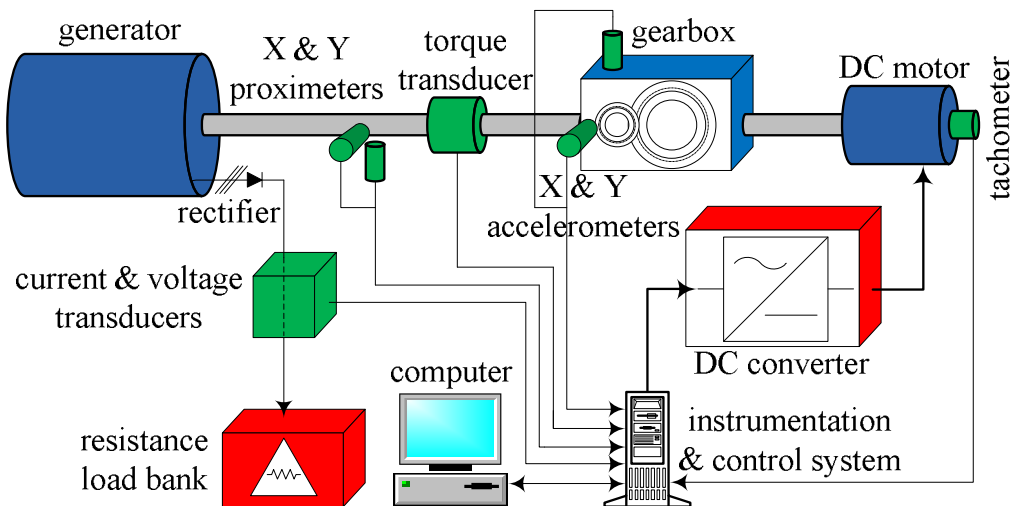


圖 3.1 A diagrammatic representation of the Test Rig (Tavner et al)



圖 3.2 A photograph of the Test Rig

- 試驗台的機械特性

如同前面章節所述，就風力發電機傳動系統而言，常見的故障型式發生在於葉片、變速箱及發電機等，因此本試驗機以直流馬達及其控制器來重新呈現葉片，而這馬達將帶動傳動軸經由變速箱及高速軸來驅動發電機，除了這些主要構件外，本試驗台另配置有資料收集系統詳如圖 3.2。

機件的轉動慣性、剛性及阻尼將會決定傳動系統的機械行為以及其所誘發響應之自然頻率或振幅大小，以本試驗機簡化而論其機械性質如圖 3.3。

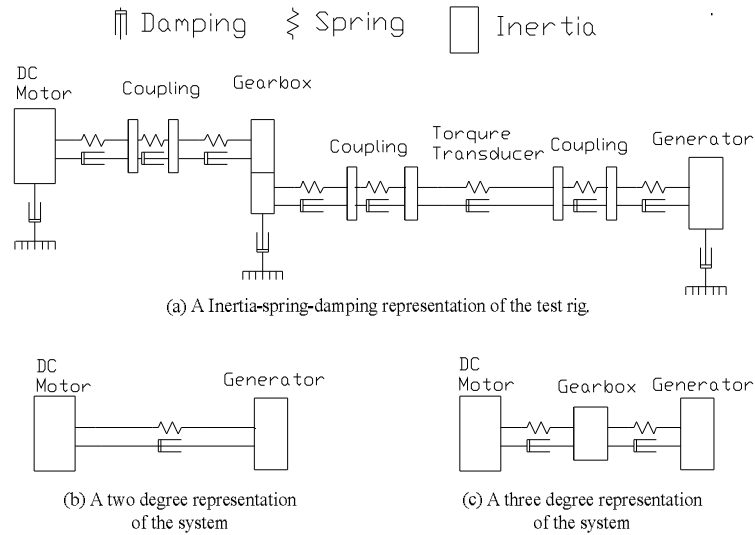


圖 3.3 Different degree of freedom representations of the Test Rig

### 扭轉公式

在考量風力機傳動系統經常出現問題以及長平均修護時間項目因素下，可將風力發電機傳動系統簡化為直流馬達、變速箱及發電機來代表，其機械性質可由圖 3.4 來加以表示。

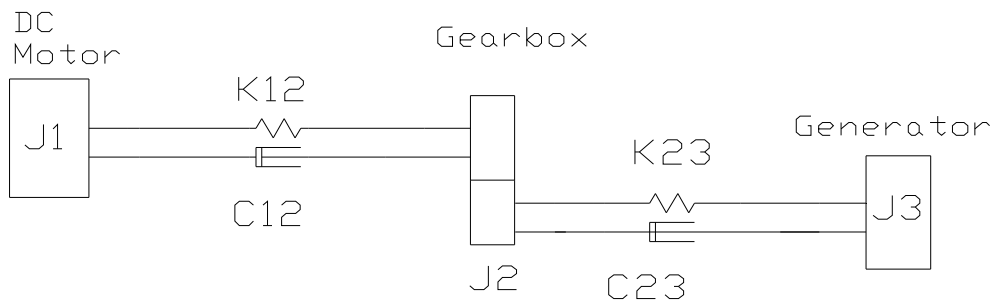


圖 3.4 Three degree of freedom torsional system with gear box representing the Test Rig

迴轉系統之扭轉公式如下：

$$J\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + k\theta = T \quad (3.1)$$

將扭轉公式應用至圖 3.4 三個自由度的系統上，可獲得扭轉公式如下：

$$\begin{bmatrix} J_1 & 0 & 0 \\ 0 & J_2 & 0 \\ 0 & 0 & J_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{12} & -c_{12} & 0 \\ -c_{12} & c_{12} + \frac{c_{23}}{n^2} & -\frac{c_{23}}{n} \\ 0 & \frac{c_{23}}{n} & c_{23} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{12} & -k_{12} & 0 \\ -k_{12} & k_{12} + \frac{k_{23}}{n^2} & -\frac{k_{23}}{n} \\ 0 & \frac{k_{23}}{n} & k_{23} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} T_{DC} \\ 0 \\ T_{DFIG} \end{Bmatrix} \quad (3.2)$$

#### 變速箱之等效扭轉慣性矩

有關變速箱之扭轉等效慣性矩支球得方式可由下攻勢進行估算：

$$J_{eq} = J_1 + \frac{J_2}{(m_1)^2} + \frac{J_3}{(m_1 m_2)^2} \quad (3.3)$$

其中 J 分別代表不同轉動件之慣性矩、m 代表不同階段的齒數比。

## 4、測試與模擬

本章節將介紹用以獲得試驗台傳動系統構件之獨立及複合機械特性，之相關試驗方式及模擬方法。

- 步階功能測試(Step Function Test)

本試驗將對配置不同變速箱的試驗機進行步階試驗，藉由控制器設定額定轉速將傳動系統驅動進行角位移訊號對時間的分析。其中只要藉由分析記錄器所收集的時域之角位移訊號時即能獲取系統之剛性與阻尼如圖 4.1 所示。

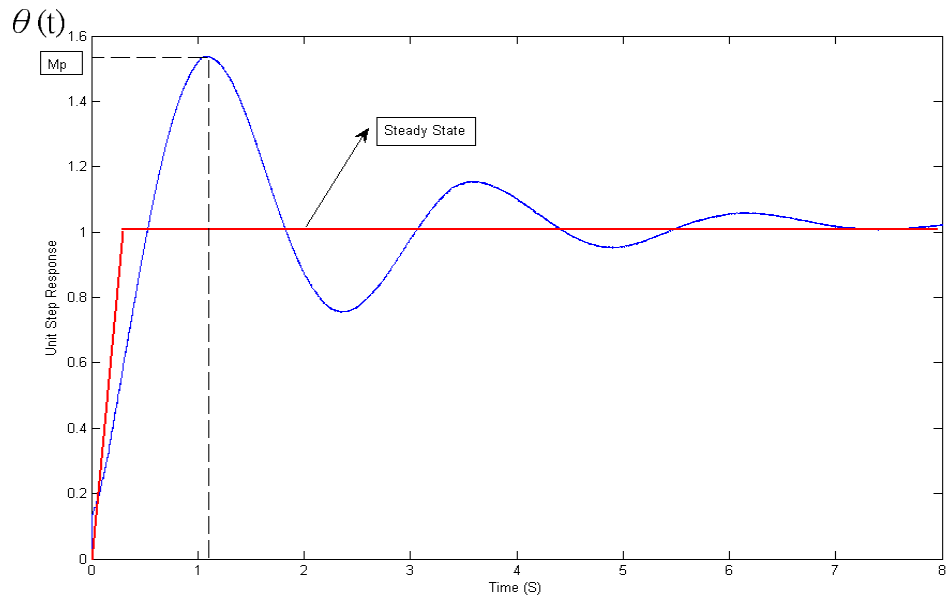


圖 4.1 A typical step response of simple oscillator

- 掃頻測試

就大型風機而言，風力發電機其轉子運轉速度在於 0~25RPM 之間，相較於傳統發電設備運轉於臨界自然頻率之上(如一般柴油發電機)，就風力發電機而言其運轉速度介於塔架與傳動機組之自然頻率之間，因此為了獲取更多傳動系統在不同頻率下的響應，本試驗將起分別對不同發電機變速箱的試驗機進行掃頻實驗，試驗機將被從靜止啟動直到高速軸達 2000RPM 後並以同樣減速速率將試驗機停止，其掃頻過程如圖 4.2 所示。其過程中將收集軸上之扭力訊號，並將此訊號進行傅利葉轉換用以獲取傳動軸之自然頻率特性。

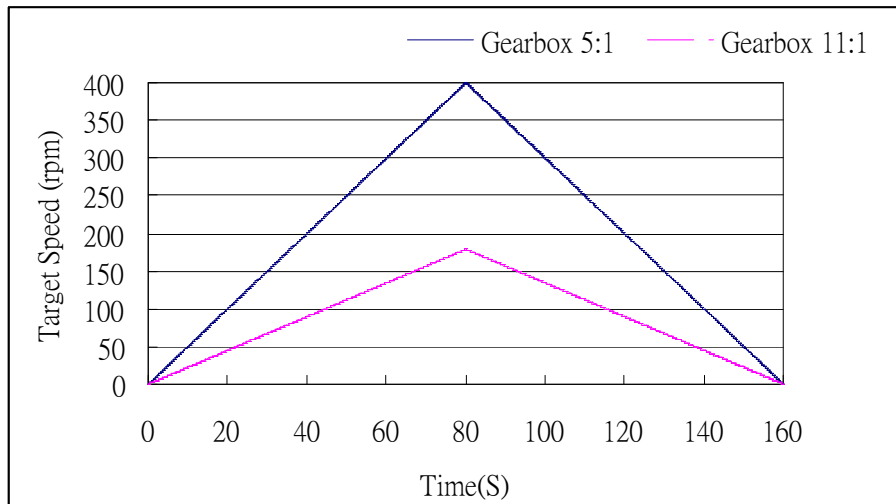


圖 4.2 Test Rig run up and run down target speed test

- Matlab 軟體自然頻率計算

前述試驗所取得有關簡化後傳動軸模型之機械性質(如圖 3.3c)，將使用 Matlab 軟體來進行自然頻率計算；以了解造成不同頻率響應的主要根源為何，將會變動計算之機械性質(諸如慣性矩、剛性及阻尼等)來進行靈敏度分析，以找出特定頻率與特定機械性質之間的相互關係。

## 5、結果分析與討論

### 5.1 剛度與自然頻率

藉由以下鐘擺模型(如圖 5.1)可獲取系統的自然頻率為：

$$f_{n(5.1)} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k \frac{J_1 + J_2}{J_1 J_2}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{2.6 \times 10^5 (4.5)} = 172 \text{ Hz}$$

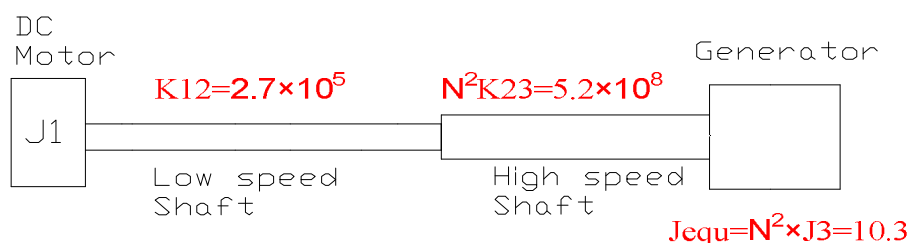


圖 5.1 An equivalent simple pendulum model of the Test Rig



由估算而得的自然頻率來看，此高頻之自然頻率來自於系統的高剛度所致，由於鐘擺模型究估算過程中只考量到系統的剛度與轉動慣量，因此初步估算結果是合理的。

## 5.2 比較試驗台之測試與模擬結果

### 5.2.1 不同變速箱步階試驗結果比較

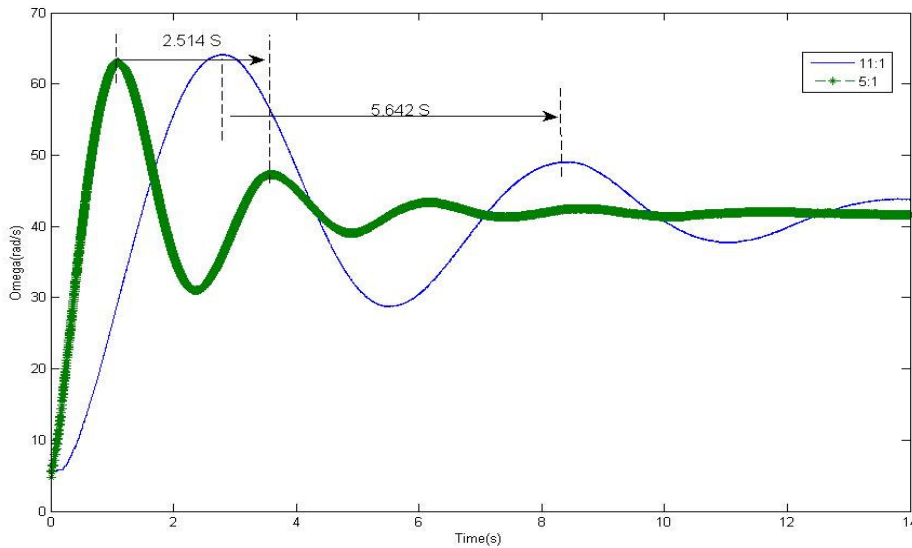


圖 5.2 Angular speed responses of Test Rig with different gearboxes

圖 5.2 為齒輪比分別為 5:1 及 11:1 之時域上角速度響應，由圖中明確獲知此兩系統的自然頻率分別為 0.40Hz 及 0.18Hz，這頻率的不同來自於不同的齒輪比，其關係如下：

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{J}}$$

而其中變速箱的等效慣性矩與齒數比的平方有關：

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{n^2 \times J}} = \frac{1}{n} \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{J}}$$

就兩種不同齒輪比而言(5:1 及 11:1)而言其自然頻率如下：

$$f_{5:1} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{5^2 \times J}} = \frac{1}{5} \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{J}}$$

$$f_{11:1} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{11^2 \times J}} = \frac{1}{11} \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{J}}$$

其頻率比會與其齒輪比有關：

$$\frac{f_{5:1}}{f_{11:1}} = \frac{11}{5} = \frac{0.398}{0.177}$$

就實驗數值及理論推論而論，自然頻率與齒輪比的關係如下：

$$f_1 \times n_1 = f_2 \times n_2$$

其中  $f$  為自然頻率， $n$  為齒數比。

### 5.2.2 時域分析

圖 5.3 中可看出步階試驗從機組啟動到停止，其響應訊息中可被分類成啟動振盪期、穩定狀態區及關機振盪期等三個時期。

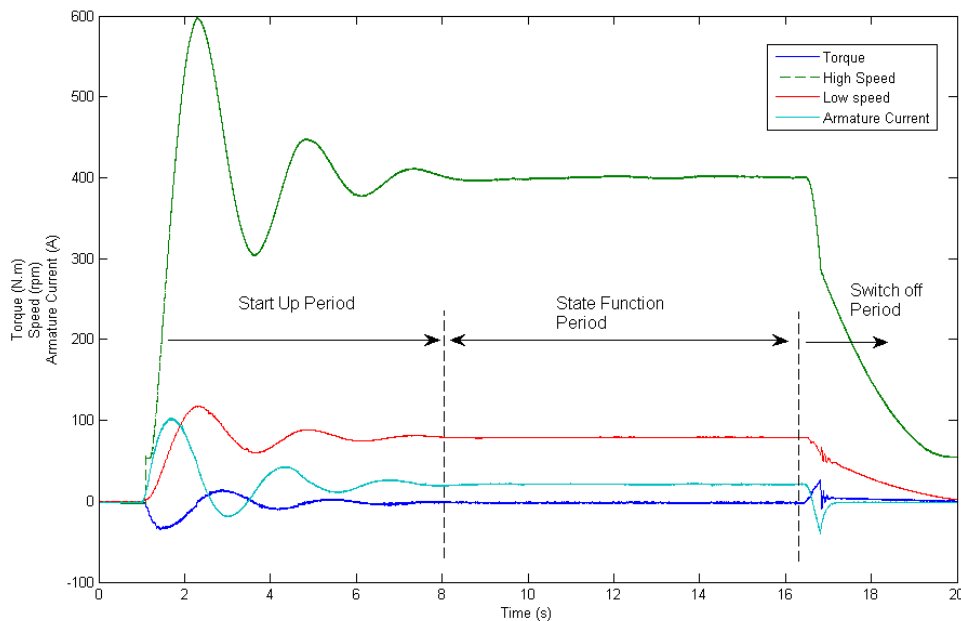


圖 5.3 Different stages of Test Rig operation in the step function time domain test result

圖中可顯示啟動振盪時期所顯示的振盪現象較為停機振盪時期來的代表系統的響應行為，其可能原因如下：

- 啟動時期

就理論而言，當試驗台被設定一個目的輸出轉速時，試驗台會經歷一個步階輸出。但因為受到試驗台的機械上的剛性、轉動慣量及電氣驅動系統的影響，試驗台本身會系統到達穩定運轉速度時產生振盪。就一般實務上來說，直流馬達的啟動電流大約是運轉電流的 4~6 倍，圖 5.3 中可以看出啟動時第一個電流峰值大概是 100A，剛好等於 5 倍運轉電流(20A)，因此這現象可能來自於直流馬達驅動系統所致，再者當

試驗台被馬達驅動加速時，系統的阻力會隨轉速增加而增加，因而也造成驅動馬達電流隨之加大；而當試驗達到額定轉速時其阻力產生之扭矩也隨之減少，另外當系統速度被設定時直流馬達的電樞電壓會由下列方程式決定：

$$V_{dc} = E_b - I_a \times R_a \quad E_b = N \times \Phi \quad (\text{如圖 5.4})$$

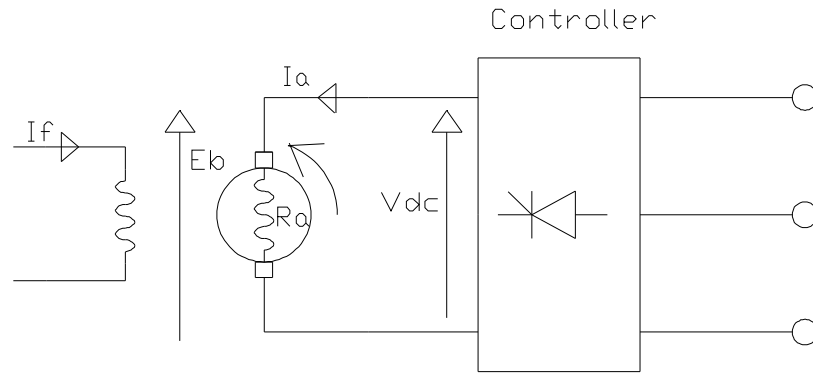


圖 5.4 DC motor controller

在試驗台啟動時程，直流馬達變壓控制器提供一個額定目標輸出電壓  $V_{dc}$ ，然而馬達的旋轉速度及電樞電流會隨著馬達阻力轉矩變動，其中馬達阻力轉矩又會隨系統速度變動而改變。因此在系統抵達穩定狀態前，馬達輸出扭矩與試驗台扭矩之間的不平衡狀態造成啟動時期的電樞電流的振盪現象。

系統的機械性質將會決定試驗台的動態行為，比如說齒輪比將會直接決定系統的自然頻率。依據圖 5.2 之計算結果系統的自然頻率會因不同的齒數比而有所不同，因此試驗台之低頻自然頻率響應可能是來自於馬達控制器與變速箱齒數比的綜合結果。

#### ● 關機時期

如圖 5.5 所示，依據直流馬達電流的狀況，可將關機時期細分為關機程序時期、振盪時期以及無受力衰減時期。

#### 關機程序時期

從圖中可以看出完成關機程序需要 0.44 秒，當關機按鍵被按下時，試驗機之發電機本身之轉動慣性矩將帶動整個試驗機繼續運轉，在此同時馬達電樞電流被強制減少，但這部份並非是進行反向的步階激振，此時期另可在直流馬達電流為 0 之左右

兩側發現兩種不同之速度衰減區域，其主要原因在於受到 DC 馬達的暫態影響，當電樞電流轉換為負值時馬達會進入發電機工作區因而產生電氣煞車現象，因此在此工作區域時系統速度衰減率也隨之增加，而當反向電流最大值到達 48A，這電流值使得馬達控制器跳脫。

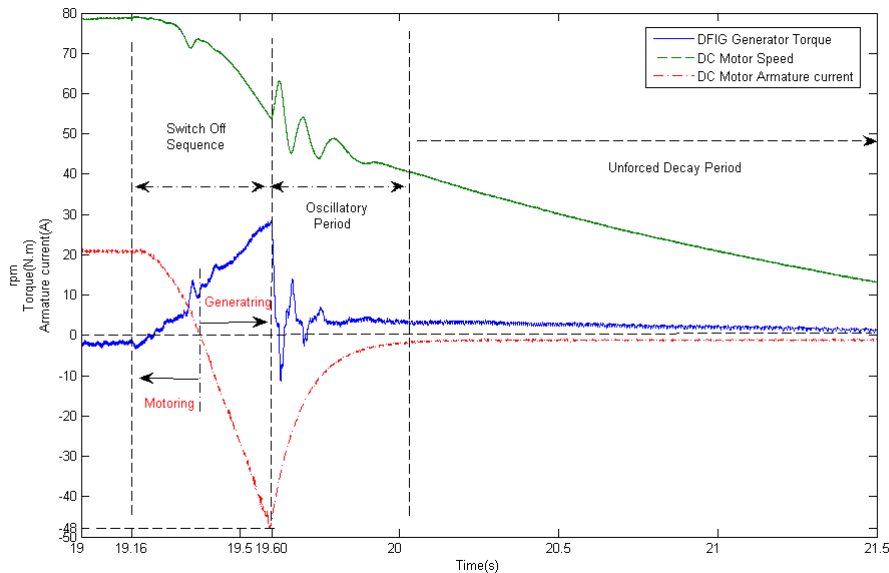


圖 5.5 Test Rig switch off response

### 振盪時期

馬達電流於限制電流試著從下限值(-48A)到零電流執行步階回歸，這段期間內試驗台發生振盪行為直到電樞電流回歸到零值，其中馬達速度及發電機扭矩的振盪頻率大概是 12.5Hz。這振盪頻率應該是直流馬達以及變速箱被發電機帶動的綜合結果。圖中另外可知就扭力訊號會受齒輪咬合影響而有較大雜訊呈現。

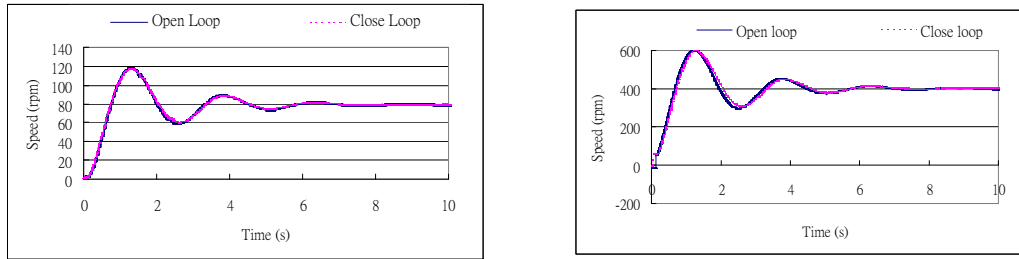
### 無受力衰減時期

當發電機扭力及直流馬達回歸到零值時，系統衰減的速度只有旋轉速度有關，其中可看出衰減速度的斜率會隨速度變小，這主要是來自於測試台本身的軸承、電樞繞線以及電扇效應等影響。

- 直流馬達轉換控制器的影響

由圖 5.6 中可以看出，速度及扭力訊號，不管直流馬達控制器在開啟或是關閉狀

態下型態極為相同，由此圖中可知系統振盪的行為與直流馬達控制器無關。



(a) Time domain Tachometer response (b) Time domain Torque pulse speed response

圖 5.6 Time domain responses of different control loops

### 5.2.3 機械性質來自步階試驗

系統的剛性、阻尼及慣性矩等特性會決定試驗台對單元輸入的響應，就此理論下不可齒輪比的試驗台機械性質如圖 5. 表 5.1。

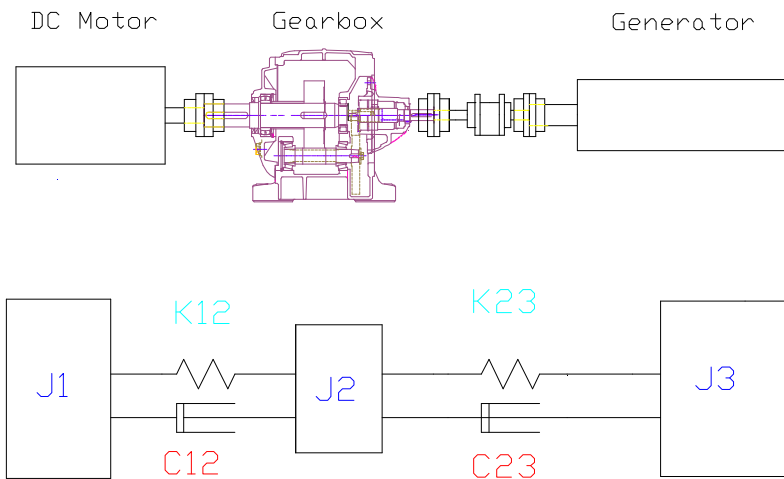


圖 5.7 Equivalent stiffness-damping- inertia of a Test Rig

表 5.1 Mechanical Parameter of different test rig

Test rig with 5:1 gearbox	Test rig with 11:1 gearbox
$K_{12}=1806(\text{Nm/rad})$	$K_{12}=22100(\text{Nm/rad})$
$C_{12}=8.46(\text{Kg. rad/m})$	$C_{12}=8.90(\text{Kg. rad/m})$
$K_{23}=66.95(\text{Nm/rad})$	$K_{23}=125.00(\text{Nm/rad})$
$C_{23}=2.74(\text{Kg. rad/m})$	$C_{23}=3.77(\text{Kg. rad/m})$

表 5.1 顯示試驗台的剛度及阻尼會隨著不同的齒數比而有所不同。其中高速軸的低剛性

是來自扭力感知器；而當變速箱的齒數增加其阻尼值也隨之加大，其中造成高齒數比高阻尼的主要原因如下：

- (1)齒輪咬合強度與齒數比成正比，在相同的輸入轉速下高齒輪比咬合頻率較高，因而造成更多摩擦損失。
- (2)對相同輸入條件下高齒數比之輸出軸迴轉速度較高，其會造成來自軸承及齒的回轉損失。

### 5.3 模擬結果

#### 5.3.1 不同變速箱的模擬結果

將上述取得之機械性質輸入Matlab程式中，其計算模型如圖 5.8，計算結果如表 5.2。

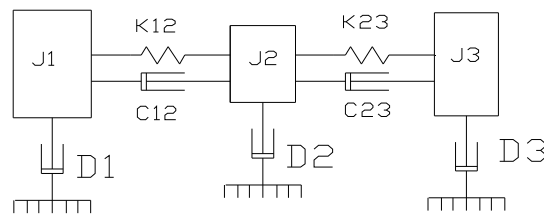


圖 5.8 Equivalent stiffness-damping- inertia of a Test Rig connected with support

表 5.2 Natural frequency of Test Rig with different gearboxes

	$f_1, \text{Hz}$	$f_2, \text{Hz}$	$f_3, \text{Hz}$
Test rig with 5:1 gearbox	121.53(119.03)	2.09(2.09)	0(0)
Test rig with 11:1 gearbox	199.50(199.40)	2.78(2.78)	0(0)

表 5.2 中分別顯示無阻尼系統及阻尼系統之模擬計算自然頻率，其中()內數值為有阻尼系統之自然頻率。

表 5.2 所顯示系統的三個自然頻率，其中  $f_1$  及  $f_2$  分別來自於高速軸、低速軸及傳動系統之結果，另外  $f_3$  來自於系統邊界剛性，在此模擬計算時設定為零。

### 5.4 靈敏度分析

使用 Matlab 軟體所完成的靈敏度分析結果如圖 5.11 及 5.12。

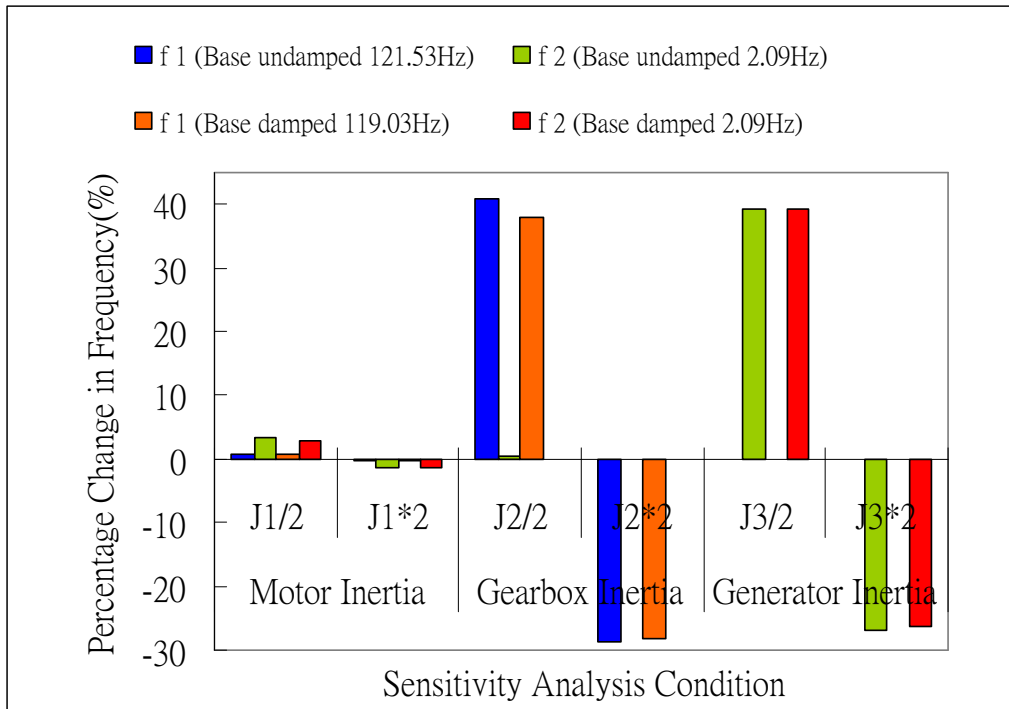


圖 5.9 Inertia influences on the natural frequencies

由圖 5.9 中可看出  $f_1$  會隨著變動  $J_2$  變速箱之轉動慣性矩而變動，而  $f_2$  會隨著  $J_3$  發電機轉動性矩而變動。

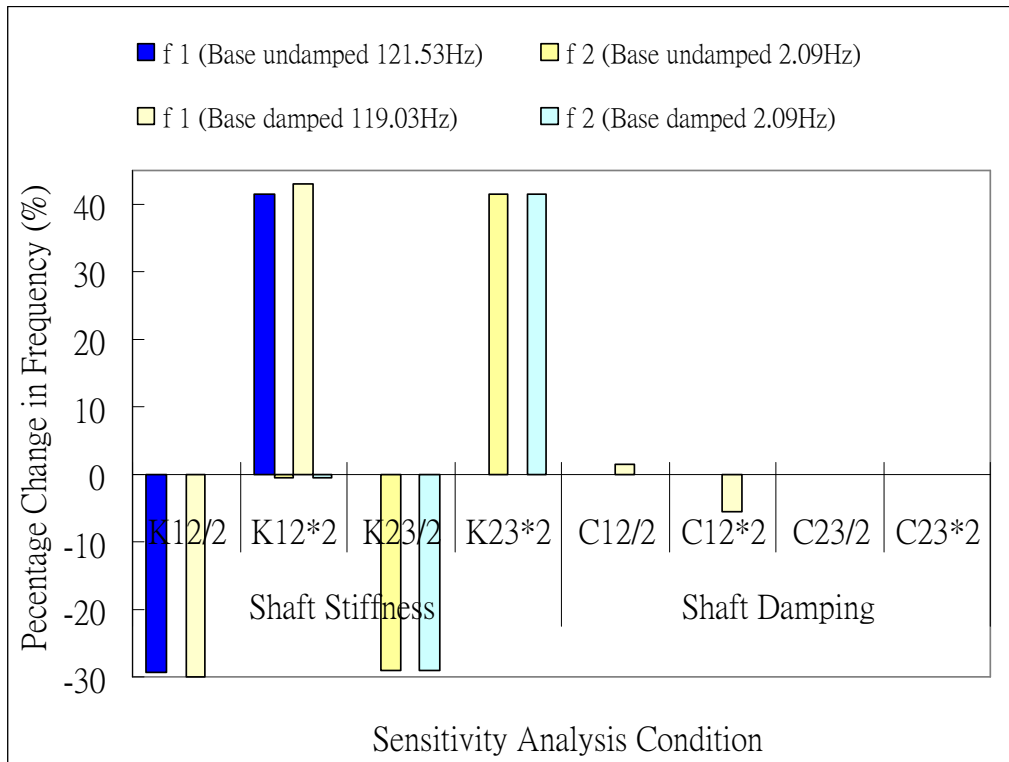


圖 5.10 Influences of stiffness and damping on the natural frequencies  
 由圖 5.10 中可看出，變更軸之阻尼並不影響系統之響應頻率，而  $f_1$  及  $f_2$  會隨著  $K_{12}$  及  $K_{23}$  高、低速軸之剛性變動而改變。

就靈敏度分析來看可獲得下列結論：

- (1)  $f_1=121\text{Hz}$ ，決定於系統內最之高剛度參數， $K_{12}$  參數，以及整個測試台綜合影響，而其中最主要影響因素為  $J_2$ ，變速箱慣性矩。
- (2)  $f_2=2\text{Hz}$ ，決定於系統最低之剛度參數， $K_{23}$  參數，以及整個測試台綜合影響，而其中最主要影響因素為  $J_3$ ，發電機慣性矩。
- (3)  $f_3=0\text{Hz}$ ，決定於系統邊界剛度，而本身析邊界剛度設為零。

#### 5.4 變頻測試之頻域結果

如同前面顯示結果，就時域所獲得之系統自然頻率是類似但有些微不同，本章節將藉由頻域上扭力訊號的 PSD 分析來確認系統之頻率響應。

##### 5.4.1 配置 5:1 變速箱試驗台之頻域分析

圖 5.11 為配置 5:1 變速箱試驗台之扭力訊號頻譜圖，就頻譜圖來看，其中在不同頻率



下共有五個峰值出現，其 50Hz 與 100Hz 之響應峰值來自於電力供給系統所致。

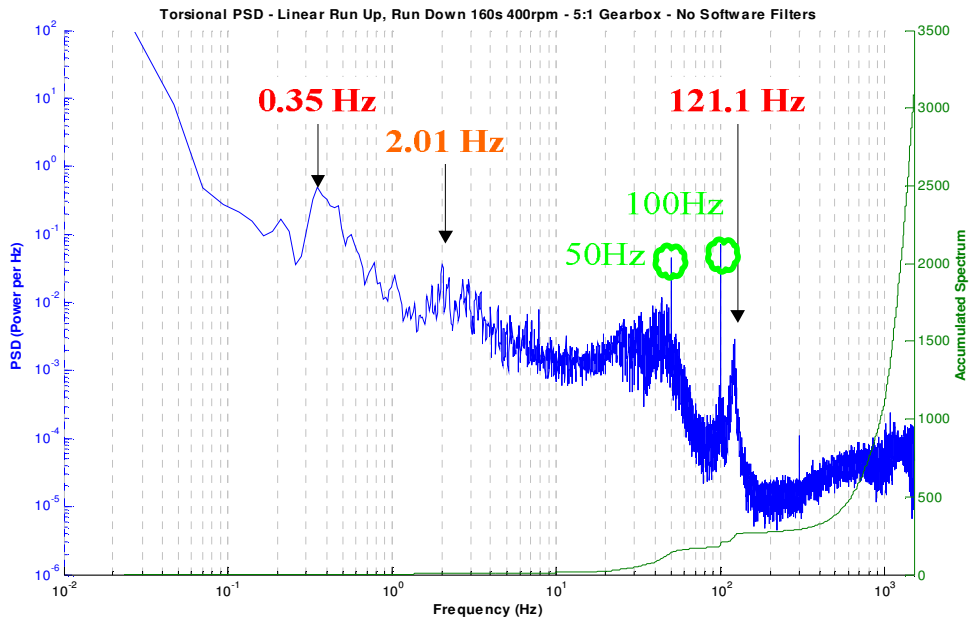


圖 5.11 Torsional PSD for the Test Rig with 5:1 gearbox

#### 5.4.2 配置 11:1 變速箱試驗台之頻域分析

圖 5.12 為配置 11:1 變速箱試驗台之扭力訊號頻譜圖，其頻譜圖式樣與 5:1 試驗台極為相似，其中除了 50Hz 與 100Hz 之響應峰值來自於電力供給系統外，其他三個峰值出現不同頻率數值上，產生部分偏移。

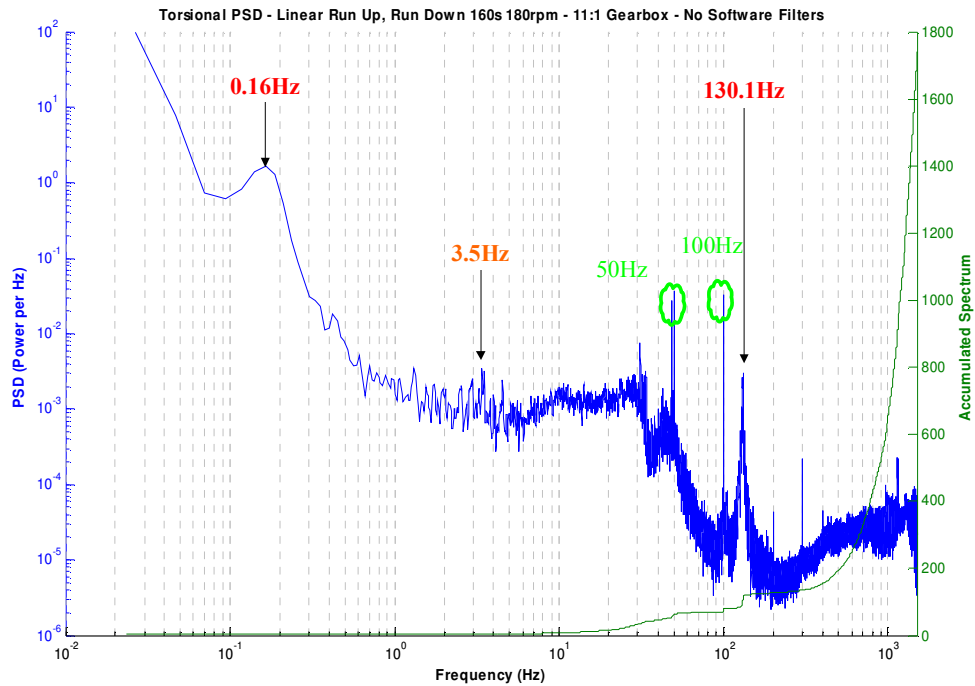


圖 5.12 Torsional PSD for the Test Rig with 11:1 gearbox

由以上兩個不同變速箱系統的 PSD 訊號來看，可推論傳動系統試驗台能以簡化成三個自由度的系統來有效表現其機械行為。實用上，自然響應式樣的偏移與試驗台的機械性質有關，換句話來說，頻率響應特性的改變能對應出機械構件的機械性質狀態變化，舉例來說，當傳動軸產生裂紋時會降低軸之剛性、而電器故障會增加系統之阻尼值，因此藉由監看風力機傳動軸之扭力訊號之 PSD，將有助於早期預知相關元件之故障情形。

### 5.5 獲得試驗台響應自然頻率

表 5.3 Natural frequencies from the different methods

Test Rig	Method	$f_1, \text{Hz}$	$f_2, \text{Hz}$	$f_3, \text{Hz}$
With 5:1 Gearbox	Pendulum model	172.00	N/A	N/A
	Time Domain Test	N/A	N/A	0.40
	Frequency Domain Test	121.10	2.01	0.35
	Matlab Simulation	119.03	2.09	0
With 11:1 Gearbox	Method	172.00	N/A	N/A
	Pendulum model	N/A	N/A	0.18
	Time Domain Test	131.10	3.50	0.16
	Frequency Domain Test	199.40	2.78	0

試驗台之自然頻率可藉由計算及量測取得，表 5.3 呈現不同方法所獲得的系統自然頻率。由本表中可看出不同方式所取得之自然頻率會相互呼應，其中鐘擺模型可以快速但會有些微高估系統的自然頻率，其原因在於其忽略了傳動軸上聯結器對系統剛性之影響。

## 6、結論

風力機傳動系統試驗台之自然頻率可由從時域、頻域上用不同方法來加以取得；獲得系統之自然頻率響應與試驗台上特定機件之物理關係。本篇的主要結論如下：

- (1)以兩軸來連接直流馬達、變速箱及發電機等主要設備的三個自由度系統，可以有效地重現整個系統自然頻率響應行為。其中單自由度模型也與三個自由度之結果吻合。
- (2)系統構件之機械性質改會導致扭力訊號頻率響應式樣之偏移，藉由線上分析傳動軸扭力訊號，將可對可能故障提供及早告知以及作為傳動系統構件之缺失診斷參考。
- (3)藉由分析與探討風力傳動系統之機械性質，以及考量葉片、變速箱及發電機等構件故障發生之次數及嚴重性來看，藉由監看傳動軸的扭力訊號來獲取這些機件的機械性質將會對提升風力發電機的容量因數有很大的正面效應。

## 7、參考文獻

1. E. W. Golding, Generator of Electricity by Wind Power. E&F. N. Spon, London, 1995.
2. J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A L. Rogers. Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. Wiley, Chichester; New York, 2002.
3. BTM Consult. World Market Update 2006. Technical Report BTM consult Aps, I. C. Christensens All 1, DK-6950 Ringbing, Denmark, 2006.
4. A. D. Hansen. Wind Power in Power System: Generator and Power Electronics for Wind Turbines. John Wiley & Sons, West Sussex, 2005.

5. J.G Slootweg, S.W.H. de Haan, H. Polinder and W.L.Kling. Wind Power in Power System: Generator and Power Electronics for Wind Turbines. John Wiley & Sons, West Sussex, 2005.
6. R. Harrison, E. Hau and H. Snel. Large Wind Turbine Design and Electronics. John Wiley & Sons, West Sussex, 2000.
7. H.G. Matthies et al. Study of Offshore Wind in the EU. Jour 0072, Verlag Naturliche Energie. 1995.
8. J.F. Manwell, J.G. McGowan and A.L. Rogers. Wind Energy Explained. Wiley, Chichester; New York, reprinted with corrections edition, 2002.
9. P.J. Tavner, G.J.W van Bussel, and F. Spinato, Machine and Converter Reliabilities in Wind Turbine International IEE Conference, Power Electrics Machines and Drives, Dublin, April 2006, 6pp.
10. P.J. Tavner, J. Xiang, and F. Spinato. Reliability for Wind Turbine, Wind Energy, 2007 10:1-18
11. A. G. Dutton, P Vionis, D Lekou, P.A. Joosse, A. Anastassopoulous, D. Kouroussis, T. Kossivas, T.T. Assimakopoulou, G Fernando, C. Dolye and A. Proust. Acoustic emission condition monitoring of turbine blades: laboratory certification testing to large scale in-service deployment. EWEC, 2003.
12. E. J. Wiggelinkhuizen, T.W. Verbruggen, H. Braam, L. M. M. Rademakers, J. Xiang S Watson, G. Giebel, E Norton, M. C. Tipluica, A. Maclean, A. J. Christensen, E. Becjer and D. Scheffler. CONMOW: Condition monitoring for offshore wind farms. EWEC2007 conference, Italy. 2007.

13. P. J. Tavner, M. R. Wilkinson and F. Spinato. Condition monitoring of generator and other subassemblies in wind turbine drivetrains. IEEE SDEMPED conference, Cracow, 2007.
14. E. j. Nestorides. A Handbook on Torsional Vibration. Cambridge University Press, London. 1958.
15. C. W. de Silva. Vibration: Fundamentals and Practice. London. 1999.

## 陸、建議事項

- 1、 提供增進同仁外語能力得學習機會：由公司補助同仁於下班後之語言進修費用、或委請訓練所開授相關語文課程供同學前往修習。另訓練所亦可建立小型外語村的生活方式協助學員實際開口說英語。
- 2、 提前一個年度辦理出國甄選，以便通過甄選作業之人員能有充足時間準備相關出國手續及進行學校申請作業。
- 3、 視前往國家現況調整生活補助費：如倫敦地區生活及物價水準是全世界最高的都會之一，若以通案式生活補助，對於在這類大都會求學的員工，實質上之開銷會稍顯不足之現象，據了解此補助標準已施行多年未調整，建議反應物價指數適度調整該生活補助費用，以反映實際生活所需之開銷。
- 4、 增加派遣人員出國留學員額，提供更多員工能打開國際視野及增進本職學能的機會，讓人才培養不中斷。另外善用公司教育訓練體系，讓出國人員能將所學有效率的傳承給其他相關人員。