

出國報告（出國類別：開會）

參加 2019 歐洲風能科學會議
（WESC）及論文發表

服務機關：台灣電力公司綜合研究所

姓名職稱：鄭錦榮 化學監主任

派赴國家：愛爾蘭

出國期間：108 年 6 月 15 日至 108 年 6 月 21 日

報告日期：108 年 8 月 20 日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：參加 2019 歐洲風能科學會議（WESC）及論文發表

頁數 27 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台電人事處/陳德隆/02-23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

鄭錦榮/台電綜合研究所/化學與環境研究室/化學學監主任/02-80782231

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他

出國期間：中華民國 108 年 06 月 15 日 至 108 年 06 月 21 日

出國地區：德國

報告日期：中華民國 108 年 08 月 20 日

分類號/目

關鍵詞：鍍鋅表面缺陷、量化評估

內容摘要：（二百至三百字）

參加 2019 風能科學會議（WESC）及論文發表，WESC 2019 設計了 8 個不同的跨領域主題，共接受來自 12 個國家 30 個研究機構的 60 篇專家邀稿論文演講，685 篇論文分四天在科克大學發表與討論。線上監測系統是近年來在大型機組上發展起來的一門新興技術，隨著大型風力發電機容量的迅猛增加，現在離岸風力發電機正從數兆級向數十兆瓦級發展，機械結構也日趨複雜，不同部件之間的相互聯繫、耦合也更加緊密，所有風電場仍然遵循 10% 的線上監測建議。為使其能依規制發揮功能，則建立適當的葉片劣化監控診斷計畫是首要步驟，由研究資料顯示，風力機葉片是容易損壞的構件之一，由於風機廠商技術資訊有限釋出，承包商保固期結束後，公司將要面對風機關鍵性元件形形色色的毀損及維護，因此面對多家廠商機種與技術、設計資訊不公開，如何建立監控、偵測、破損

分析、修補及更換技術，需密切了解由丹麥及德國聯合進行之「ReliaBlade 計畫和風力發電機葉片可靠性的驗證」計畫的研究進度與訂立公司後續離岸風機監控設備規範。目前葉片監控技術仍以光柵光纖結合中樞神經系統或音洩結合中樞神經系統較為可行，至於如何對各項因風況、環境、材料、結構等各種變化，導致粘結層剝離、纖維斷裂、積層脫落等現象發生正確診斷，有賴深入研究。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網

(<http://report.nat.gov.tw/reportwork/>)

摘要

參加 2019 風能科學會議 (WESC) 及論文發表，WESC 2019 設計了 8 個不同的跨領域主題，共接受來自 12 個國家 30 個研究機構的 60 篇專家邀稿論文演講，685 篇論文分四天在科克大學發表與討論。線上監測系統是近年來在大型機組上發展起來的一門新興技術，隨著大型風力發電機容量的迅猛增加，現在離岸風力發電機正從數兆級向數十兆瓦級發展，機械結構也日趨複雜，不同部件之間的相互聯繫、耦合也更加緊密，所有風電場仍然遵循 10% 的線上監測建議。為使其能依規制發揮功能，則建立適當的葉片劣化監控診斷計畫是首要步驟，由研究資料顯示，風力機葉片是容易損壞的構件之一，由於風機廠商技術資訊有限釋出，承包商保固期結束後，公司將要面對風機關鍵性元件形形色色的毀損及維護，因此面對多家廠商機種與技術、設計資訊不公開，如何建立監控、偵測、破損分析、修補及更換技術，需密切了解由丹麥及德國聯合進行之「ReliaBlade 計畫和風力發電機葉片可靠性的驗證」計畫的研究進度與訂立公司後續離岸風機監控設備規範。目前葉片監控技術仍以光柵光纖結合中樞神經系統或音洩結合中樞神經系統較為可行，至於如何對各項因風況、環境、材料、結構等各種變化，導致粘結層剝離、纖維斷裂、積層脫落等現象發生正確診斷，有賴深入研究。

目 次

行政院及所屬各機關出國報告提要.....	2
摘 要.....	4
目 次.....	5
一、目的.....	6
二、行程概要.....	8
三、會議及參訪內容.....	9
3.1 2019 歐洲風能科學會議 (WESC)	9
3.2 THEME 6 STRUCTURES, SAFETY AND RELIABILITY.....	10
3.2.1 海上風電場資產管理的結構健康監測 ⁽¹⁾	14
3.2.2 海上風力發電機單樁的結構健康監測 ⁽²⁾	15
3.2.3 風力發電機葉片振動損傷的鑑別 ⁽³⁾	16
3.2.4 ReliaBlade 計畫和風力發電機葉片可靠性的驗證 ⁽⁴⁾	17
3.2.5 提高風力發電機葉片複合材料強度的漸進損傷模型 ⁽⁵⁾	20
3.2.6 逆向工程技術應用在風力發電機葉片損壞修復 ⁽⁶⁾	21
四、心得與感想.....	24
五、參考文獻.....	26

一、目的

1. 參加歐洲風能學會 (EAWC) 在愛爾蘭科克大學舉辦之 2019 年風能科學會議，並在會議中發表 "Application of Reverse Engineering Technology on FRP Wind Turbine Blades" 論文一篇，從會議中收集相關風力發電研究資料。
2. 目前台電公司一~五期及低碳島計畫共有 169 台大型風力發電機加入台電服勤機組，總容量為 294MW，風機安裝在海邊，面臨各種嚴酷的環境，二十年使用壽命內，葉片旋轉次數達 10^8 次的量級，葉片皆承受重力所造成的彎矩及振動，構成疲勞破壞的來源，國外大型風力機玻璃纖維葉片設計使用壽命可達 20 年，在台灣高溫、高濕、日照強度強的亞熱帶海島氣候區域的使用期間，葉片受到各種外界環境及風荷載的組合影響，更會縮短葉片的使用年限，風機葉片故障率佔風力發電組件故障比例約 13%，風機葉片遭遇環境破壞偏高，由於風力機皆為國外進口，對於葉片損傷維修及事故肇因分析，因缺乏葉片完整資料，當發生損傷事故時，需配合原廠進行維修及事故診斷，然而該冗長的程序與等待時間，均使得公司造成發電營利損失，經由研究以逆向工程重建大型風力發電機 FRP 葉片的應用技術，還原葉片設計資料，取得葉片之外型資料、材料種類、積層疊序，以掌握其特性，研發建立自主維修技術，不僅可提升風機可用率，更能精準掌握葉片結構與材料機械性質，增加事故肇因分析的精確性。因此希望透過此會議與世界先進專家學者交流提高研究技術及推廣應用。
3. 報告人之前曾從事風力發電機葉片相關研究包括(1)2016 年度獲得風力發電計畫「應用逆向工程重建大型風力發電機 FRP 葉片的修補及事故肇因分析技術」亞洲電力金牌獎；(2)協助營建處「離岸風機塔座腐蝕防治」風力發電規劃研究工作；(3)近五年國內發表

「風機葉片」相關論文 6 篇(2014、2015 年台灣風能學會優秀論文獎)；(4)協助再生處蕃蜜颱風彰濱 V80 之 6 支葉片損傷理賠處理；(5)協助會計處建立風機葉片使用報廢年限推算；(6)協助中修處彰工(1)風場 23 支葉片表面塗層損壞處理；(7)協助再生處觀園 #12 GE-1.5SE 風機葉片破損肇因診斷分析。

4. 風能科學會議 (WESC) 是歐洲風能學會雙年度會議，會議是聚集風能領域的頂尖科學家和研究人員，以口頭報告和幾個並行的方式展示他們的最新發現，會議後可提交全文至 JWES (Wind Energy Science) 刊登，WESC 2019 設計了 8 個不同的跨領域主題，共接受來自 12 個國家 30 個研究機構的 60 篇專家邀稿論文演講，685 篇論文分四天在科克大學發表與討論，WESC 2019 是一個真正的國際化，學科化，開放的討論論壇，申請人已獲准在 Theme 6: Structures, Safety and Reliability 中論文發表；從會議收集資料繼續協助風機葉片破損肇因診斷分析。

二、行程概要

本案開會含往返行程共 7 天，即自民國 108 年 06 月 15 日至同年 06 月 21 日止，其行程概要簡述如下：

參訪機構名稱	地點	詳細工作內容
愛爾蘭科克大學	愛爾蘭	2019 歐洲風能科學會議 (WESC) 及論文發表.

三、會議及參訪內容

3.1 2019 歐洲風能科學會議 (WESC)

風能科學會議 (Wind Energy Science Conference, WESC) 是歐洲風能學會雙年度會議，會議是聚集風能領域的頂尖科學家和研究人員，以口頭報告和幾個並行的方式展示他們的最新發現，會議後可提交全文至 JWES (Wind Energy Science) 刊登，WESC 2019 設計了 8 個不同的跨領域主題，包括 Theme 1 Wind Resource, Turbulence and Wakes；Theme 2 Turbine Technology and Aeroelasticity；Theme 3 Wind to Wire Power Systems；Theme 4 Social, Economic and Policy；Theme 5 Turbine Lifecycle Considerations；Theme 6 Structures, Safety and Reliability；Theme 7 Offshore Wind Energy；Theme 8 Special Sessions，共接受來自 12 個國家 30 個研究機構的 60 篇專家邀稿論文演講，685 篇論文分四天在科克大學發表與討論，WESC 2019 是一個真正的國際化，學科化，開放的討論論壇。

6 月 17 日在科克大學 Kane Building 舉辦開幕典禮，分別由 WESC 2019 會議主席 Dr. Cian Desmond；UCC(University College Cork)校長 Prof. Patrick O'Shea；EAWC (European Academy of Wind Energy) 主席 Prof. Carlo Bottasso；MaREI (Research Centre for Marine & Renewable Energy) 處長 Prof. Brian O'Gallachoir；SEAI (Sustainable Energy Authority of Ireland) 處長 John McCaun 致詞說明 WESC 舉辦會議目的及愛爾蘭在再生能源的發展，如圖 1 所示。



圖 1：2019 歐洲風能科學會議科克大學 Kane Building 舉辦開幕典禮

3.2 Theme 6 Structures, Safety and Reliability

報告人主要參加在 Theme 6 Structures, Safety and Reliability，在該議題中共分 12 場次，每場次分別為 4-5 篇論文發表，報告人被分配在 6.5 場次，詳細資料如表 1 所示，本報告分別引用由德國 Ruhr University 所發表的「海上風電場資產管理的結構健康監測」；比利時 Vrije Universiteit Brussel, OWI-lab, W. Weijtjens 所發表的「海上風力發電單樁的結構健康監測」及 Chile, Santiago, Universidad de los Andes, Faculty of Engineering and Applied Sciences, 的 J.M. Gutiérrez 等作者共同發表「風力發電機葉片振動損傷的鑑別」等三篇與結構健康監測相關論文扼要論述。由 Denmark, Technical University of Denmark, Roskilde, Department of Wind Energy 的 K. Branner 教授領導的團隊發表「ReliaBlade 計畫和風力發電機葉片可靠性的驗證」；由 Turkey, METU, Ankara, Dep. Aerospace Engineering and METUWind, 的

博士後研究生 C. Muyan 所發表之「提高風力發電機葉片複合材料強度特性的漸進損傷模型」及由報告人論文發表「逆向工程技術應用在風力發電機葉片損壞修復」等風力發電機葉片損壞模擬分析相關論文三篇。

表 1 : 4-Day conference program with Theme 6 Structures, Safety and Reliability

Session No.	Session title	Details	Speaker ID	Speaker	Organisation	Presentation title	Paper ID
6.1a.	MS: Structural Health Monitoring Chair: Prof. Eleni Chatzi ETH Zurich	Tuesday 18th 14:10-15:50 Boole: BB2	221	Mr. Sharif Khoshmanesh	TU Delft (Delft University)	Development of a new Condition monitoring appr	137
			265	Mr. Simon Tewolde	Ruhr University Bochum	Structural health monitoring for asset management	235
			342	Dr. C.M. Franchi	Federal University of Sant A	Deep Learning Algorithm for Fault Imbalance I	284
			526	Dr. Wout Weijjens	Vrije Universiteit Brussel	Monitoring offshore wind, towards Structural Hea	440
			542	Dr Francisco Jaramillo	Universidad De Los Andes	Vibration-based damage identification of wind tur	456
6.1b.	MS: Structural Health Monitoring Chair: Prof. Eleni Chatzi ETH Zurich	Tuesday 18th 16:20-18:00 Boole: BB2	384	Dr Imad Abdallah	ETH Zurich	Probabilistic fault diagnostics using ensemble time	478
			380	Mr. Alan Kenna	Trinity College Dublin, B	Damage Detection on Wind Turbine Towers using	561
			625	Mr Imad Abdallah	ETH Zurich	Fault diagnosis in Wind Turbines using Bayesian ?	566
			642	Dr. Kartik Chandrasekhar	University Of Sheffield	A new machine learning approach to identify dam	590
6.2a.	MS: Fatigue Monitoring & Decision Support Chair: Prof. Michael Muskulus NTNU	Wednesday 19th 09:00 - 10:40 Boole: BB2	656	Prof. John Dalgaard Sorensen	Aalborg University	Reliability requirements for life extension of wind	611
			587	Mr. Jorge Mendoza	Ntnu	Integrated risk-based life-cycle optimisation of of	512
			588	Ms. Elizabeth Bismut	Technische Universitat M	Effect of a monitoring system on the optimal insp	513
			712	Dr. David Mcmillan	Strathclyde	The Offshore Wind OPEX Ecosystem	724
6.2b.	MS: Fatigue Monitoring & Decision Support Chair: Prof. Michael Muskulus NTNU	Wednesday 19th 11:10-12:50 Boole: BB2	653	Prof Michael Muskulus	Ntnu	How to reach your lifetime goals - a framework fo	610
			260	Mr. Maximilian Henkel	Vrije Universiteit Brussel	Validation of Virtual Sensing on Subsoil Measure	511
			606	Dr. Abbas Kazemi Amiri	University Of Strathclyde	Assessment of site-wide life extension potential of	535
			155	Mr Saptarshi Sarkar	Trinity College Dublin	Fatigue damage estimation of fairlead connections	575
6.3.	MS: Optimising O&M Chair: Prof. Athanasios Kolios University of Strathclyde	Thursday 20th 11:10-12:50 Kane: G18	65	Mr. Pablo G. Morato	ANAST - University of Li	Computational performance of risk-based inspecti	695
			591	Dr. Iraklis Lazakis	Department Of Naval Arc	Offshore wind operational planner for optimal O&	711
			716	Prof ATHANASIOS Kolios	University of Strathclyde	Risk-based maintenance of critical offshore wind t	741
			608	Ms. Sofia Koukoura	University of Strathclyde	O3M-Development of an open access O&M tool f	7
6.4.	MS: H2020 Project INFRASTAR Chair: Prof. John Dalgaard Sorensen Aalborg University	Wednesday 19th 16:20-18:00 Boole: BB2	9	Mr. Amol Mankar	Aalborg University Denm	Optimization of pre-stressing in gravity based fou	540
			615	Ms. Lijia Long	Bundesanstalt Fur Mater	On the value of SHIM information for offshore wi	546
			126	Mrs. Sima Rastayesh	Aalborg University	Risk assessment of adverse events for wind turbine	568
			505	Joey Velarde	COWI / Aalborg Universit	Development of Fatigue Resonance Limit State fo	577
704	Mr. Gianluca Zorzi	Gud Consult	Reliability analysis of offshore wind turbine foun	663			

Session No.	Session title	Details	Speaker ID	Speaker	Organisation	Presentation title	Paper ID
6.5.	MS: Reliability of Wind Turbine Blades Chair: Dr. Claudio Balzani Leibniz Universität Hannover ForWind	Tuesday 18th 11:10-12:50 West Wing: WW6	609	Dr. Kim Branner	DTU Wind Energy	ReliaBlade - A new project and a new vision for	539
			630	Dr. Claudio Balzani	Leibniz University Hannover	Comparison of different concepts for the fatigue an	570
			702	Jakub Piwowarczyk	Fraunhofer Iwes	Numerical Analysis of Fatigue Effort in Dual Axis	660
			378	Mr. M. Can Muyan	Odtu - Ruzgen	Progressive damage modelling for improving strer	438
			63	Dr. Jjin-Rong Cheng	Chemistry And Environme	Application of Reverse Engineering Technology in	529

Session No.	Session title	Details	Speaker ID	Speaker	Organisation	Presentation title	Paper ID
6.6.	Modelling Chair: Dr. Jimmy Murphy UCC	Monday 17th 11:10-12:50 West Wing: WW6	327	Mr. Ozan Gozcu	Dtu Wind Energy	Geometrically Nonlinear Wind Turbine Blade Red	257
			315	Mr. Joshua Henneberg	Leibniz University Hannover	FE-based design concept for axially loaded groute	247
			344	Mr. Daniel Matzke	Center For Wind Power D	Validation of MBS modelling methods to represer	288
			345	Mr. Anders Wickström	RISE, Research Institutes (Design and validation of modular wind turbine tov		291
			178	Dr. Youlin Zhang	Shanghai Electric Windpo	Vortex induced response analysis of a wind turbine	100

Session No.	Session title	Details	Speaker ID	Speaker	Organisation	Presentation title	Paper ID
6.7.	Testing & Experimentation Chair: Dr. Jimmy Murphy UCC	Wednesday 19th 14:10-15:50 West Wing: WW6	208	Ms. Sara Porchetta	von Karman Institute for F	Ice shedding phenomenon: an experimental and nu	135
			72	Wei Si	Shanghai Electric Windpo	Data-Driven Wind Turbine Health Monitoring bas	23
			16	Dr. Kwangtae Ha	Fraunhofer	Conceptual design and preliminary study of segme	33
			110	Mr. David Melcher	Fraunhofer Institute for W A	novel rotor blade fatigue test setup with elliptic	79
			55	Mr. Matthias Stammner	Fraunhofer IWES	Endurance and acceptance test for pitch bearings	13

Session No.	Session title	Details	Speaker ID	Speaker	Organisation	Presentation title	Paper ID
6.8.	Monitoring Chair: Dr. Imad Abdallah ETH Zurich	Thursday 20th 14:10-15:50 Kane: G18	149	Mr. Hadi Hoghooghi	ETHZ	Optical Measurements of Multi-Megawatt Turbine	149
			304	Mr. Oran Murray	University Of Limerick	Towards real-time autonomous inspection of wind	224
			284	Mr João Pacheco	Faculty Of Engineering, U	Development of new strategies for optimized struc	197
			607	Dr. Yichao Liu	Delft University of Techno	Model-based fault diagnosis for floating offshore	537
			318	Dr. W. Dheeliban Remigius	Technical University Of D	Estimation of wind turbine shaft remaining lifetim	243

Session No.	Session title	Details	Speaker ID	Speaker	Organisation	Presentation title	Paper ID
6.9.	Design Chair: Prof. Athanasios Kolios University of Strathclyde	Thursday 20th 09:00 - 10:40 Kane: G18	191	Dr. Michael Lockan	Brandenburg University of	Stability Analysis and Robust Optimization of a W	117
			239	Mr. Kieran O'Leary	University College Cork	Designing a floating wind turbine spar substructur	154
			207	Mr. A.A Candade	Tu Delft/enerkite Gmbh	Modelling, design and optimisation of composite	309
			388	Mr. Ozgun Sener	Metuwind Center For Win	Comparison of Euler-Bernoulli Beam and Superele	353
			184	Mr. Nikolas Manousides	Institute For Wind Energy	Investigation of the material anisotropy of epoxy-t	105

Session No.	Session title	Details	Speaker ID	Speaker	Organisation	Presentation title	Paper ID
6.10.	Inverse Engineering & Damage Detection Chair: Dr. Imad Abdallah ETH Zurich	Monday 17th 16:20-18:00 Kane: G19	194	Mr. Benedikt Hofmeister	Institute Of Structural Ana	An Inverse Model Reduction Method for Finite El	140
			692	Prof. Biswajit Basu	Trinity College Dublin	Structural analysis of floating offshore wind turbin	644
			197	Ms. Laura Schröder	DTU Wind Energy	Finding a connection between load exposure and fi	236
			211	Mr. Lih Wang	The University Of Tokyo	A study of nonlinear sway-rocking model for eval	128

3.2.1 海上風電場資產管理的結構健康監測⁽¹⁾

本文由德國 S. Tewoldea, b, R. Höffera and H. Haardt 學者所發表，主要說明海上風力發電產業在化石能源轉型中發揮著可再生能源來源的重要作用。但對於急促的轉變，只談清潔和環保友善是不夠的。可再生能源在成本和可靠性方面也需要與其他能源競爭。至於每個新興產業，風能開始都很昂貴。但隨著在設計和施工方面的技術進步，已經實現了顯著的成本降低。但仍然，正如一些研究(Rolf de Vos. FLOW competitive through cooperation. 2016；DNVGL. Offshore wind: a manifesto for cost reduction. 2014)所表明：很大可能是通過風力發電機使用壽命期間的運行和維護（O&M）優化來進一步降低成本。

為了有效優化風力發電機的 O&M，了解風的持續性能非常重要，以便可以及時採取行動。世界上幾乎所有的海上風電場都是配備結構健康監測（SHM）系統。例如，在 2015 年之前的德國，BSH Bundesamt für Seeschiffahrt und Hydrographie（德國聯邦海事和水文局）建議在海上風電場中 10% 的風力發電機要配備基礎監控系統。但在 2015 年，風力發電機 10% 的監控系統建議被“代表性海上風電場址”所取代。這給了海上風電場運營商更多的靈活性，同時也更加靈活有責任提出一個概念，以確保其結構的安全運作。在這種情況下，幾乎所有風電場仍然遵循 10% 的建議。

本文討論了基於振動的結構健康監測，並通過實例說明來自北海海上風電場的 SHM 數據分析結果。內容包括：開發全球監測概念，採用強大而高靈敏度的感測器，適合於近海環境。此外，監控概念充分利用了可用的類似結構通過在所有受監控的風力發電機上實施相同的

感測器位置來監控。

數據分析方法，根據複雜程度將數據分析分為三個階段。很重要考慮到不斷收集的大量數據，第一階段包括 10 分鐘統計數據評估，用於檢測結構完整性的變化或即時破壞感測，這個階段利用來自相同位置的感測器的響應監控風力發電機。第二階段數據分析涉及模態和疲勞分析，這些分析也已完成有一些即時滯後。第三階段利用經驗證的有限元素模型（FEM）作為在損壞、劣化或維護之後，需啟動和更新的極限低限值，環境和操作條件也用於補償它們對結構行為的影響。

數據分析結果進一步後處理，以識別危險的操作條件並提出如何優化它們以實現有效資產管理的計劃。並且對結構整體疲勞壽命對特殊情景影響是可量化。在不久的將來，最終目標是使用 SHM 數據開發基於風險的檢查（RBI）計劃分析結果。這可以幫助 SHM 數據分析結果以更緊湊的方式呈現並準備好使用表格，以便它們可以直接用作風電場 O&M 決策的輸入運營商。

3.2.2 海上風力發電機單樁的結構健康監測⁽²⁾

本文是由比利時 Vrije Universiteit Brussel, OWI-lab, W. Weijtens 所發表的「海上風力發電單樁的結構健康監測」，位於布魯塞爾自由大學的比利時研究倡議 OWI 實驗室一直積極參與在海上風力發電機上進行測量。自 2011 年以來在比利時近海區域的幾個風力發電機上進行加速和應變的連續測量。這些長期測量活動的結果，主要關注結果如何可用於監測海上風力發電機的邊界條件（例如沖刷）。觸及處理這些大量數據的特殊挑戰，並提供一些相關的信息對風力發電機行為的見解。Nobelwind 海上風電的創新監控設置，將更加深入在單樁上使用布拉格

光柵光纖的風場提供了土壤的交互作用深入圖像結構。了解在螺栓連接中使用應變計的情況評估使用壽命並優化運維。最後研究海上風電的未來，並嘗試找出所面臨的挑戰特定於不斷增長的 XL 單樁以及監測如何相應地發展。

3.2.3 風力發電機葉片振動損傷的鑑別⁽³⁾

本文由 Chile, Santiago, Universidad de los Andes, Faculty of Engineering and Applied Sciences, 的 J.M. Gutiérrez 等作者共同發表「風力發電機葉片振動損傷的鑑別」，在土木和機械系統中振動的損傷鑑別一直是最常用的健康狀況 (SoH) 監測方法之一。通常，這種方法假設輸入輸出在結構遭受損壞之前和之後，可以使用僅輸出動態數據。實驗模態分析 (EMA) 和操作模態分析 (OMA) 技術用於估計來自記錄的僅輸入和僅輸出動態數據的模態參數。然後，損壞可以通過分析這些模態屬性的變化來識別 (檢測，定位和量化) 從中導出的量 (例如固有頻率和模式曲率的曲率) 取決於結構的物理特性 (即質量，剛度和能量耗散機制)。

在風力發電機的情況下，葉片是系統的關鍵部件之一，它們是容易受到損害，主要是由於疲勞，因為它們的操作條件。因此它是通過使用損傷診斷和預測算法來監測他們的 SoH 是最重要的。至通過實驗研究和設計這些算法，一個進行靜態和動態測試的系統設計並建造了小型風力發電機葉片 (5kW 風力發電機，葉片長為 2.5m) 如圖 2 所示。試驗機可以施加具有不同幅度和頻率的正弦負載，然後產生重複負載造成的損壞。研究考慮了兩例結構損傷，首先是一系列應用疲勞型試驗來逐漸損壞葉片。其次，誘發了人為損傷考慮沿葉片的不同嚴重程

度和位置，在這兩種情況下，衝擊和回拉測試在不同程度的損害下進行。

在回拉和衝擊測試期間由加速度計陣列測量的自由振動響應數據，在不同的損壞程度下，使用僅輸出來識別葉片的模態屬性系統鑑別算法，已鑑別的模態屬性和數量的變化，然後使用基於模態的損傷指數將其與物理損傷相關聯。



圖 2：小型風力發電機葉片進行靜態和動態試驗

3.2.4 ReliaBlade 計畫和風力發電機葉片可靠性的驗證⁽⁴⁾

由 Denmark, Technical University of Denmark, Roskilde, Department of Wind Energy 的 K. Branner 教授領導的團隊發表「ReliaBlade 計畫和風力發電機葉片可靠性的驗證」，風能領域的兩個世界領先機構，德國弗勞恩霍夫風能系統研究所 IWES 和丹麥 DTU 風能公司，在新的 1760

萬歐元 RELIABLADE 項目中聯合力量和國家資助項目，開展戰略合作以加強研究合作，並為歐洲工業合作夥伴提供新的創新服務。朝這個方向邁出的第一步是共同開發使用 Digital Twins 的更大願景，提高葉片可靠性。這個願景是新 ReliaBlade 項目的支柱，該項目已經 2019 年 1 月啟動，結合了兩個國家項目，這些項目由丹麥的 EUDP 和德國 BMWi 資助。

該項目的長期願景是開發設計，操作和維護方法通過使用所製造的每個葉片的數字雙聯的風力發電機轉子葉片，如圖 3 所示 Digital Twin 遵循當前狀態並在其期間單獨預測每個葉片的未來狀態，整個生命週期基於自動狀態監測，多尺度建模和虛擬測試。該項目將通過商業和內部相結合，提供工業和學術界的跨部門聯繫使用完全跨學科的方法將模塊集成到一個數字平台中。

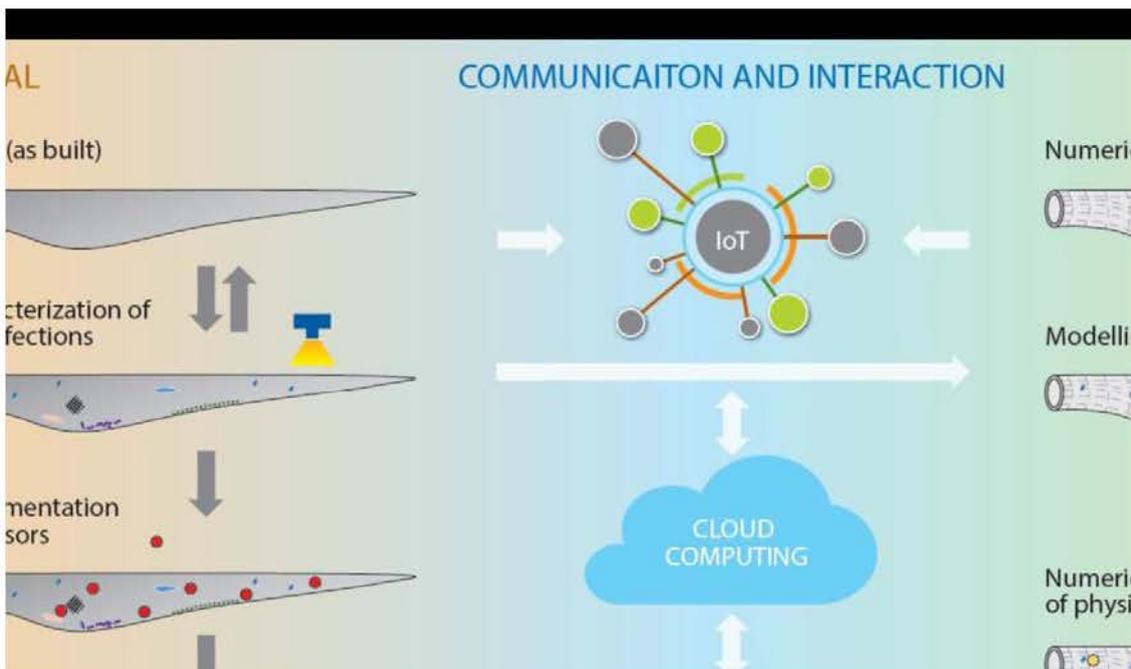


圖 3：數位葉片雙技術的開發和展示

為實現這一雄心勃勃的願景，開發了多種方法和先進工具需要。風力發電機葉片 Digital Twin 開發和演示需要共同努力，提供世界一流的研究基礎設施支持的專業科學和工業團隊，這些並非在單一國家獨家提供。

對於該項目，研究人員將開發一種 40 米葉片的葉片設計。這將作為在 Fraunhofer IWES 製造兩個葉片的藍圖，並在 DTU 的實驗測試挑戰，以便在受控條件下故意破壞。希望提高對轉子葉片結構性能的理解，開發了一個項目，以控制葉片設計，製造和測試，並可以使用先進的數值和實驗方法研究整個葉片壽命期間的損傷過程。這在風力發電機葉片研究中是獨一無二的，能夠驗證複雜的損傷模型。

為了涵蓋各種不同的損壞模式，用於測試的兩個轉子葉片將包括生產誤差，例如較差的粘合線和復合材料或夾層材料的損壞，然後將測試葉片發送給 DTU Wind Energy 合作夥伴，在那裡將在全葉片測試中評估受損部件的行為，該項目的願景是開發風力發電機轉子葉片的設計，操作和維護方法，使用製造的每個葉片的數位雙技術。然後，將使用這個數位雙技術來跟踪當前狀態並使用自動狀態監測方法預測每個葉片在其整個生命週期中的未來狀態。

為了提高葉片的結構可靠性，德國和丹麥項目合作夥伴還計劃進行子組件測試，開發疲勞模型以及損傷預測方法。通過 RELIABLE BLADE 計畫，項目合作夥伴正在為提高轉子葉片的結構可靠性做出決定性的貢獻。這很重要，因為轉子葉片佔風力發電機成本的很大一部分，並且它們的維修和服務成本相對較高。獲得的結果將使該行業在提高成本效率，降低能源生產成本和提高其國際競爭力方面取得進展。

3.2.5 提高風力發電機葉片複合材料強度的漸進損傷模型⁽⁵⁾

本文由 Turkey, METU, Ankara, Dep. Aerospace Engineering and METUWind, 的博士後研究生 C. Muyan 所發表之「提高風力發電機葉片複合材料強度特性的漸進損傷模型」。可再生能源的風力發電機設計壽命為 20 年。因此，風力發電機元件的長期結構可靠性尤其重要，當製造，檢查和維修成本高時，特別是對於偏遠地區的風力發電機而言，複合材料葉片是風力發電機的主要元件之一，複雜的荷載條件，利用長期結構完整性可以深入了解可能導致其最終崩潰的失效機制和或模式。在這方面，全面的結構測試能夠監測葉片的機械響應各種荷載條件。然而，這些測試必須伴隨著數值模擬，以便可以正確地捕捉和理解漸進損傷發展的物理基礎。此外，可以使用先前的累進損傷模型來確定故障啟動和最終故障測試。

在這項工作的範圍內，作者以前的工作涉及力量使用 Puck 失效準則分析現有的 5m GFRP 風力發電機葉片。在以前工作有限的葉片模型建立在 ANSYS ACP 環境中。ANSYS APDL Code 開發為執行累進損傷分析和退化規則，之前研究的一部分，線性冰球材料模型與非線性漸進式 Puck 材料模型進行了比較。在圖 4 中，輪廓為描述了兩種模型的光纖間故障 (IFF) 模式 C，模式 C 是一種危險的故障模式壓縮剪切可能導致葉片坍塌。如果 IFF (C) 超過 1，則發生故障啟動。如從圖中可以看出，當使用漸進式 Puck 標準時，負載模式會因元素失敗而發生變化。因此可以得出結論，漸進式失效分析對於捕獲更逼真的模擬是必要的測試前的失效機制。這項工作的目標是確定可能導致的主要失敗機制和/或模式，在漸進式彎曲全尺寸試驗期間，風力發電機葉片

在漸進式的幫助下坍塌損傷分析。使用子模型技術和實體元素失效特徵，將研究葉片的分離，即分層，屈曲和粘合劑脫粘，在深入了解損傷發展之後，結構的弱點就會出現確定並改進葉片設計。

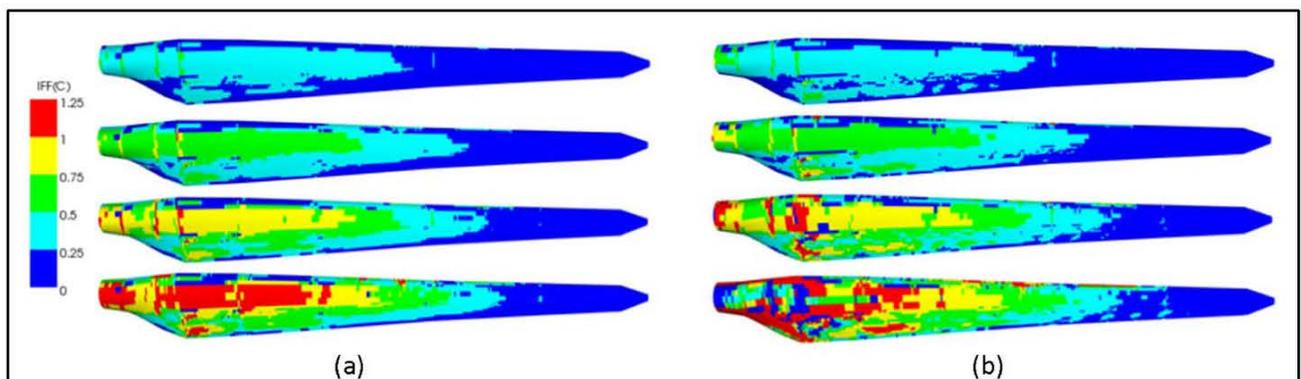


圖 4：在極端襟翼負荷的 20%，40%和 50%的吸入側葉片的 IFF(C)模式的輪廓採用(a)線性 Puck 標準；(b)漸進式圓盤的標準。

3.2.6 逆向工程技術應用在風力發電機葉片損壞修復⁽⁶⁾

本文由報告人論文發表「逆向工程技術應用在風力發電機葉片損壞修復」，迄 107 年 11 月底止，國內已建置 345 部風力發電機組，其中台電公司 169 部，民間 176 部，總裝置容量為 70.2 萬瓩。台電公司持續開發陸域風力外，也朝向離岸近海拓展風力的新場域，配合政府推動離岸風力所擬定之開放海域辦法，適時提報後期計畫，預期在 114 年可達到陸域風力 443MW、離岸風力 409MW 之總開發容量目標。

國外大型風力機玻璃纖維葉片設計使用壽命可達 20 年，在台灣高溫、高濕、日照強度強的亞熱帶海島氣候區域的使用期間，葉片受到各種外界環境及風荷載的組合影響，更會縮短葉片的使用年限，風力發電機葉片是容易損壞的構件之一，一般風力機葉片是用玻璃纖維與發泡材建造的三文治複合材料構造，有時也部份使用碳纖維，積層

塑脂則使用聚酯或環氧樹脂。複合材料結構雖然有輕量的好處，但也較軟，變形大，使用中因風況、環境、材料、結構等各種變化，易引起粘結層剝離、纖維斷裂、積層脫落等現象發生，若不能先期察覺，容易構成設備重大損傷。

隨著大型風力發電機容量的迅速增加，現在風力發電機正向數十 MW 裝置容量發展，機械結構也日趨複雜，不同部件之間的相互聯繫、耦合也更加緊密，一個部件出現故障，將可能引起整個發電過程中斷。目前大型風力發電機已加入服勤機組，為使其能依規制發揮功能，則需建立適當的葉片劣化監控診斷，由研究資料顯示，風力機葉片是容易損壞的構件之一，由於風機廠商技術資訊有限釋出，預估待風機承包商保固期結束後，公司將要面對風機關鍵性元件形形色色的毀損及維護，因此面對多家廠商機種與技術、設計資訊不公開，如何建立破損分析、修補及驗證技術，為本文主要的論述。

風機葉片故障率佔風力發電組件故障比例約 13%，風機葉片遭遇環境破壞偏高，由於風力機皆為國外進口，對於葉片損傷維修及事故肇因分析，因缺乏葉片完整資料，當發生損傷事故時，需配合原廠進行維修及事故診斷，然而該冗長的程序與等待時間，均使得公司造成發電營利損失，經由逆向工程重建大型風力發電機 FRP 葉片的應用技術，還原葉片設計資料，取得葉片之外型資料、材料種類、積層疊序，以掌握其特性，研發建立自主維修技術，不僅可提升風機可用率，更能精準掌握葉片結構與材料機械性質，增加事故肇因分析的精確性。

本文目標為(1) 風機葉片內部材料結構；(2) 風力機葉片破損肇因案例分析；(3)建立風力機葉片之逆向工程，外型 3D 量測及模態測

試、斷面結構量測、葉片積層分佈、葉片材料、機械及結構性質分析，建立各種破損修補對策及驗收基準如圖 5 所示。(4)建立風力機葉片實體修補、檢測及結構評估，提升公司風力機組使用的安全性及堪用率。針對風機葉片逆向還原出積層材料、積層疊序 以及纖維角度，再根據逆向工程所取得的積層結果進行案例模態分析。

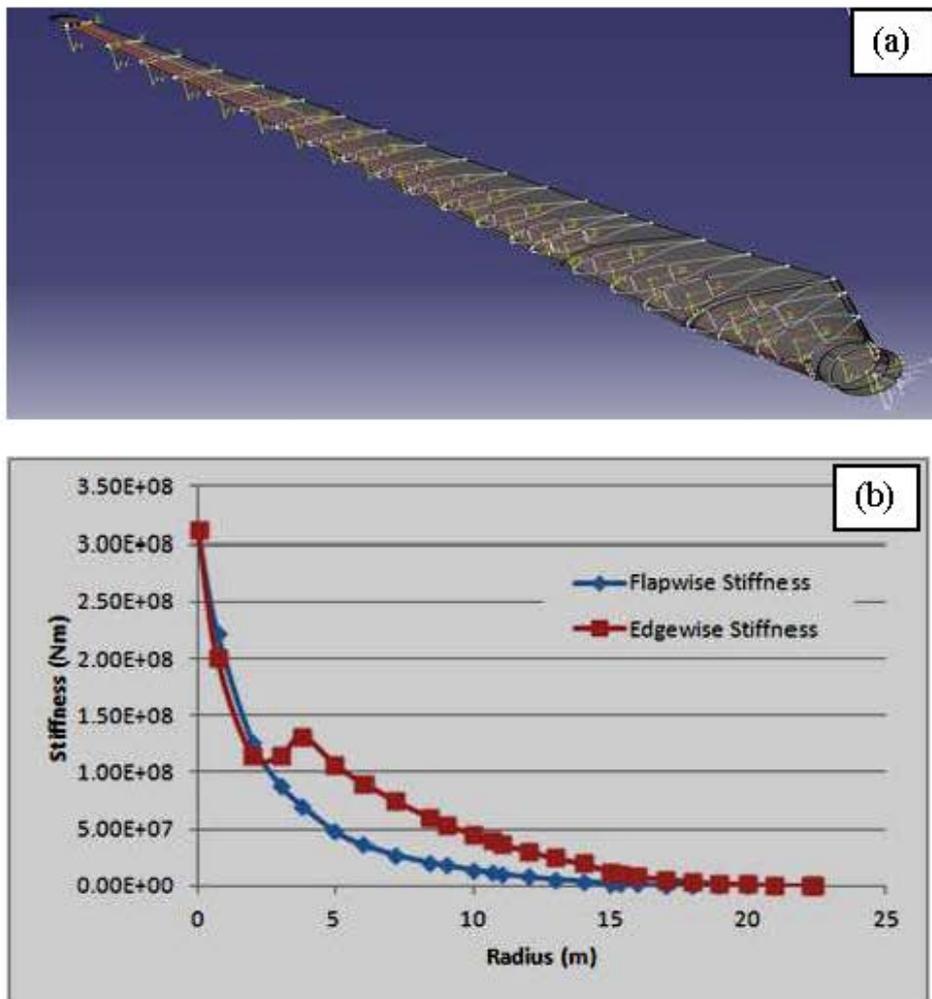


圖 5：(a)風力渦輪機內部葉片結構的 3D 模型。(b)風力渦輪機葉片彎曲剛度分佈圖

四、心得與感想

- (1) 風能科學會議 (Wind Energy Science Conference, WESC) 是歐洲風能學會雙年度會議，會議是聚集風能領域的頂尖科學家和研究人員，以口頭報告和幾個並行的方式展示他們的最新發現，WESC 2019 設計了 8 個不同的跨領域主題，共接受來自 12 個國家 30 個研究機構的 60 篇專家邀稿論文演講，685 篇論文分四天在科克大學發表與討論，WESC 2019 可作為研究人員討論及資料收集論壇。
- (2) 由 Denmark, Technical University of Denmark, Roskilde, Department of Wind Energy 的 K. Branner 教授領導的團隊進行「ReliaBlade 計畫和風力發電機葉片可靠性的驗證」，線上監測系統是近年來在大型機組上發展起來的一門新興技術，由於近代機械工業向機電一體化方向發展，機械設備高度的自動化、智慧化、大型化和複雜化，在許多的情況下都需要確保工作過程的安全運行和高的可靠性，因此對其工作狀態的監視日益重要。隨著大型風力發電機容量的迅猛增加，現在離岸風力發電機正從數兆級向數十兆瓦級發展，機械結構也日趨複雜，不同部件之間的相互聯繫、耦合也更加緊密，一個部件出現故障，將可能引起整個發電過程中斷。目前大型風力發電機已加入服勤機組，所有風電場仍然遵循 10% 的建議。為使其能依規制發揮功能，則建立適當的葉片劣化監控診斷計畫是首要步驟，由研究資料顯示，風力機葉片是容易損壞的構件之一，由於風機廠商技術資訊有限釋出，承包商保固期結束後，公司將要面對風機關鍵性元件形形色色的毀損及維護，因此面對多家廠商機種與技術、設計資

訊不公開，如何建立監控、偵測、破損分析、修補及更換技術，需密切了解 ReliaBlade 計畫的研究進度與訂立公司後續離岸風機監控設備規範。

- (3) 目前葉片監控技術仍以光柵光纖結合中樞神經系統或音洩結合中樞神經系統較為可行，至於如何對各項因風況、環境、材料、結構等各種變化，導致粘結層剝離、纖維斷裂、積層脫落等現象發生正確診斷，有賴深入研究。
- (4) 目前台電公司風力機組分別由不同廠家提供，維修計畫特別煩重，針對葉片損傷，公司相關單位應籌組維護小組建立葉片力學結構分析、複合材料的組成研究、黏合接著技術開發、防雷擊設計規劃、材料之機械化學腐蝕特性、使用壽命預估、非破壞檢測、破損分析與維護修補技術等。
- (5) 目前國外預估離岸風機可發展至 12MW，針對台灣颱風、高溫、高濕、鹽害腐蝕氣候及腐蝕防治收集相關資訊，以配合政策釐訂離岸風機相關規範及設備維修診斷方法。

五、参考文献

1. S. Tewolde, R. Höffer and H. Haardt, Ruhr University Bochum, Bochum, Germany and airwerk GmbH, Emstek, Germany, “Structural health monitoring for asset management of offshore wind farms”, WESC 2019.
2. W. Weijtjens, N. Noppea, M. Henkel, T. Verbelen and C.Devriendt, OWI-lab, Vrije Universiteit Brussel, 2 Pleinlaan., Brussels, Belgium, “Monitoring offshore wind, towards Structural Health monitoring for monopoles” , WESC 2019.
3. J.M. Gutiérrez, R. Astroza, F. Jaramillo, M. Orchard, J. Abell, M. Guarini, Faculty of Engineering and Applied Sciences, Universidad de los Andes, Santiago, Chile and Department of Electrical Engineering, University of Chile, Av. Tupper 2007, Santiago, Chile. “Vibration-based damage identification of wind turbine blades” , WESC 2019.
4. K. Branner and F. Sayer, Department of Wind Energy, Technical University of Denmark, Roskilde, Denmark and Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme IWES, Bremerhaven, Germany, “ReliaBlade – A new project and a new vision for blade reliability” , WESC 2019.
5. C. Muyan, D. Coker, PhD Candidate, Dep. Aerospace Engineering and METUWind, METU, Ankara, Turkey and Associate Professor, Dep. Aerospace Engineering and METUWIND, METU, Ankara, Turkey. “Progressive damage modelling for improving strength characteristics of a composite wind turbine blade” , WESC 2019.
6. Jiin-Rong Cheng, Huei-Jeng Lin , Chris Chen, Taiwan Power Research Institute, Taiwan Power Company, Taipei, Taiwan. Department of Engineering Science and Ocean Engineering, National Taiwan University,

Taipei, Taiwan. Atech Composites Co., Ltd., Horizon Group, Kaohsiung, Taiwan. “Application of Reverse Engineering Technology in Repairing Damaged Wind Turbine Blades”, WESC 2019.