

出國報告（出國類別：實習）

## 風力發電機複材葉片結構 損傷監測系統建立

服務機關：台灣電力公司綜合研究所

姓名職稱：鄭錦榮、化學師

派赴國家：加拿大

出國期間：100年4月30日至100年7月30日

報告日期：100年9月28日

## 出國報告審核表

|                              |   |                  |
|------------------------------|---|------------------|
| 出國報告名稱：實習風力發電機複材葉片結構損傷監測系統建立 |   |                  |
| 出國人姓名(2人以上，以1人為代表)           | 職稱  | 服務單位             |
| 鄭錦榮                          | 化學師   | 台灣電力公司綜合研究所      |
| 出國類別                         | <input type="checkbox"/> 考察 <input type="checkbox"/> 進修 <input type="checkbox"/> 研究 <input checked="" type="checkbox"/> 實習<br><input type="checkbox"/> 其他_____ (例如國際會議、國際比賽、業務接洽等)  |                  |
| 出國期間：100年4月30日至100年9月30日     |   | 報告繳交日期：100年9月28日 |
| 出國計畫主辦機關審核意見                 | <p>※1. 依限繳交出國報告</p> <p>※2. 格式完整 (本文必須具備「目地」、「過程」、「心得」、「建議事項」)</p> <p>※3. 無抄襲相關出國報告</p> <p>※4. 內容充實完備.</p> <p>※5. 建議具參考價值</p> <p>※6. 送本機關參考或研辦</p> <p><input type="checkbox"/>7. 送上級機關參考</p> <p><input type="checkbox"/>8. 退回補正，原因：<input type="checkbox"/>不符原核定出國計畫 <input type="checkbox"/>以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容 <input type="checkbox"/>內容空洞簡略未涵蓋規定要項 <input type="checkbox"/>抄襲相關出國報告之全部或部分內容 <input type="checkbox"/>電子檔案未依格式辦理 <input type="checkbox"/>未於資訊網登錄提要資料及傳送出國報告電子檔</p> <p>※9. 本報告除上傳至出國報告資訊網外，將採行之公開發表：<br/>         ※辦理本機關出國報告座談會 (說明會)，與同仁進行知識分享。<br/> <input type="checkbox"/>於本機關業務會報提出報告<br/> <input type="checkbox"/>其他_____</p> <p>※10. 其他處理意見及方式：</p> |                  |

說明：

- 一、各機關可依需要自行增列審核項目內容，出國報告審核完畢本表請自行保存。
- 二、審核作業應儘速完成，以不影響出國人員上傳出國報告至「政府出版資料回應網公務出國報告專區」為原則。

|             |  |             |                  |                       |                                 |
|-------------|--|-------------|------------------|-----------------------|---------------------------------|
| 報<br>告<br>人 |  | 審<br>核<br>人 | 單<br>位<br>主<br>管 | 主<br>管<br>處<br>主<br>管 | 總<br>經<br>理<br>副<br>總<br>經<br>理 |
|-------------|--|-------------|------------------|-----------------------|---------------------------------|

QP - 08 - 00 F06

## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：風力發電機複材葉片結構損傷監測系統建立

頁數\_\_ 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/化學師/02-80782246

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100年4月30日至100年7月30日 出國地區：加拿大

報告日期：中華民國100年9月28日

分類號/目

關鍵詞：

內容摘要：(二百至三百字)

風力機組目前並無安裝葉片結構損傷監測系統，缺乏風對葉片的荷載量測資訊，一般葉片破壞只能採目視或停機檢修，導致嚴重破損、停機維修工期長，無法即時了解葉片受到複雜氣動荷載的作用，引致環境對材料(粘結層剝離、纖維斷裂、積層脫落)及結構(應變、疲勞累積、殘餘壽命)的破壞影響加劇，葉片斷裂，更會導致轉子不平衡，葉片衝擊塔架，嚴重損壞風機的傳動系統。因此必須發展葉片監控及量測技術，能即時線上監控和預警葉片材料缺陷和損傷位置、程度等。

風力發電機複材葉片結構損傷監測系統需能提供風機葉片損傷位置和持續破壞的關鍵信息，在葉片產生破損前提供預防性維修。大幅度提高葉片複合材料構件的品質，避免葉片複合材料在使用過程中所造成的嚴重事故和延長葉片結構的使用壽命。

赴加拿大 Waterloo 大學機械及微機電工程研究所實習 MEMS 感測器製作、裝配、數據訊號量測與分析及資料傳輸等工作，建立完整葉片結構損傷監測系統的應用經驗，將有助於公司葉片結構損傷監測技術的提昇，執行方法的研訂，透過學習及討論作為未來工作規劃之參考。

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

## 摘要

風力機組目前並無安裝葉片結構損傷監測系統，缺乏風對葉片的荷載量測資訊，一般葉片破壞只能採目視或停機檢修，導致嚴重破損、停機維修工期長，無法即時了解葉片受到複雜氣動荷載的作用，引致環境對材料(粘結層剝離、纖維斷裂、積層脫落)及結構(應變、疲勞累積、殘餘壽命)的破壞影響加劇，葉片斷裂，更會導致轉子不平衡，葉片衝擊塔架，嚴重損壞風機的傳動系統。因此必須發展葉片監控及量測技術，能即時線上監控和預警葉片材料缺陷和損傷位置、程度等。風力發電機複材葉片結構損傷監測系統需能提供風機葉片損傷位置和持續破壞的關鍵信息，在葉片產生破損前提供預防性維修。大幅度提高葉片複合材料構件的品質，避免葉片複合材料在使用過程中所造成的嚴重事故和延長葉片結構的使用壽命。

赴加拿大 Waterloo 大學機械及微機電工程研究所實習 MEMS 感測器製作、裝配、數據訊號量測與分析及資料傳輸等工作，建立完整葉片結構損傷監測系統的應用經驗，將有助於公司葉片結構損傷監測技術的提昇，執行方法的研訂，透過學習及討論作為未來工作規劃之參考。

# 目 次

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 目 次 .....                          | 6  |
| 一、目的 .....                         | 7  |
| 二、行程概要 .....                       | 9  |
| 三、研習內容 .....                       | 10 |
| 3.1 SHM 工作原理及組織 .....              | 10 |
| 3.2 風力發電機複材葉片結構損傷監測系統發展 .....      | 17 |
| 3.3 MEMs 在風力發電機複材葉片結構損傷監測的應用 ..... | 27 |
| 四、心得與感想 .....                      | 31 |

## 一、目的

目前國外風機葉片研究單位皆致力研究主動的風力發電機複材葉片結構損傷監測系統方法，採用能經過波形的診斷或人工激發探測結構損壞的方法。其中以光柵光纖(FBG)及微機電系統(MEMS)感測器較具競爭性，由於光纖脆性易意外損壞及通常需要溫度補償，連接到嵌入式葉片複合材料內較困難，需要特殊的設計及使用複雜儀器等因素，導致目前光纖葉片監測系統仍未普及化，因 MEMS 製程方法的大幅改進，已發展機械性質(位置、速度、加速度、力、壓力、應力、應變)與熱性質(溫度、比熱、熱傳導)及化學性質(種類、濃度、狀態)等各方面的感測器，整合發射、傳輸、接收器同在一塊感測器內，更可配合無線傳輸，耗電量少等優點，成為研究重點。

風力機組目前並無安裝葉片結構損傷監測系統，缺乏風對葉片的荷載量測資訊，一般葉片破壞只能採目視或停機檢修，導致嚴重破損、停機維修工期長，無法即時了解葉片受到複雜氣動荷載的作用，引致環境對材料(粘結層剝離、纖維斷裂、積層脫落)及結構(應變、疲勞累積、殘餘壽命)的破壞影響加劇，葉片斷裂，更會導致轉子不平衡，葉片衝擊塔架，嚴重損壞風機的傳動系統。因此必須發展葉片監控及量測技術，能即時線上監控和預警葉片材料缺陷和損傷位置、程度等。風力發電機複材葉片結構損傷監測系統需能提供風機葉片損傷位置和

持續破壞的關鍵信息，在葉片產生破損前提供預防性維修。大幅度提高葉片複合材料構件的品質，避免葉片複合材料在使用過程中所造成的嚴重事故和延長葉片結構的使用壽命。

加拿大 Waterloo 大學機械及微機電工程研究所在 MEMS 元件整合在太陽能再生能源的應用已有豐富的製作經驗，目前進行 MEMS 應用在風機葉片噪音的智慧型健康監測(SHM)研究，申請人赴該研究所實習 MEMS 感測器製作、裝配、數據訊號量測與分析及資料傳輸等工作，建立完整葉片結構損傷監測系統的應用經驗。

## 二、行程概要

本案實習期間含往返行程共 90 天，即自民國 100 年 4 月 30 日至同年 7 月 30 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  |
|------------------|-----|---|
| 滑鐵盧大學機械及微機電工程研究所 | 加拿大 | 1. 旁聽 Micro and Nano Scale Sensing 及 Advance Microelectromechanical Systems (MEMS) and devices 2 門課程<br>2. 風力發電機複材葉片結構損傷監測系統實驗<br>a. MEMS 溫度壓力量測<br>b. CMUT 葉片材料非破壞檢測 |

### 三、研習內容

#### 3.1 SHM 工作原理及組織

風力發電機複材葉片結構損傷監測系統 Structure Health Monitoring (SHM) 包括結構損傷診斷及一般監控偵測，主要利用感測器及資料擷取方式，透過多工及網路傳輸，利用多種物理或化學自然現象監測結構物的損傷狀況，如圖 1 所示。

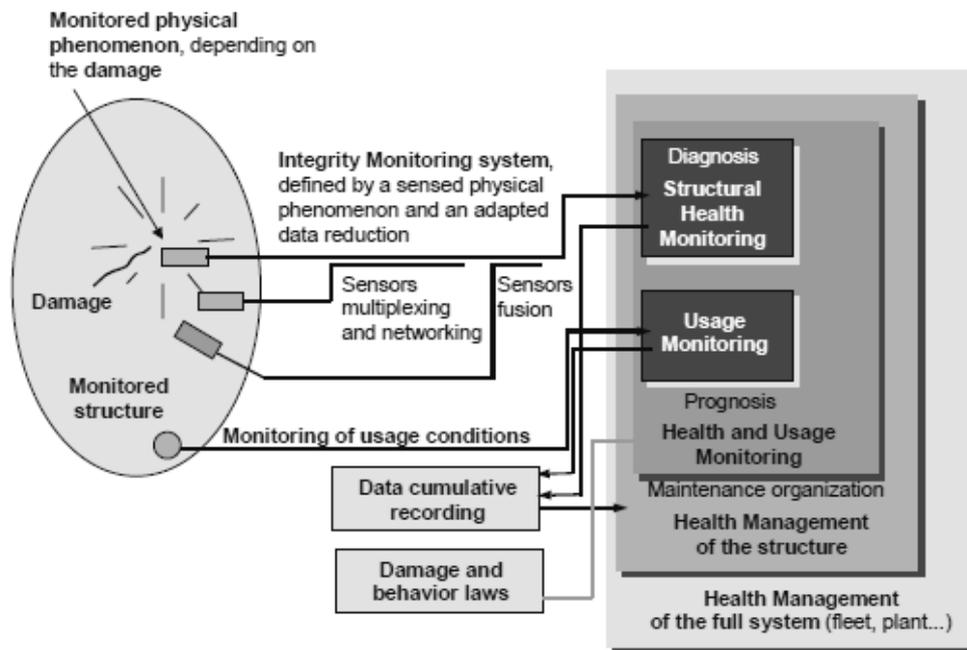


圖 1：SHM 工作原理及組織

早期使用風力發電機複材葉片結構損傷監測系統 SHM 可有效提高結構的可靠度，提高效能的品質，降低維修維護的成本，更可減少無預期的財產及生命消失，增長設備的使用年限，由圖 2 可比較監測系統裝置前後對設備維護的成本及使用年限的比較。

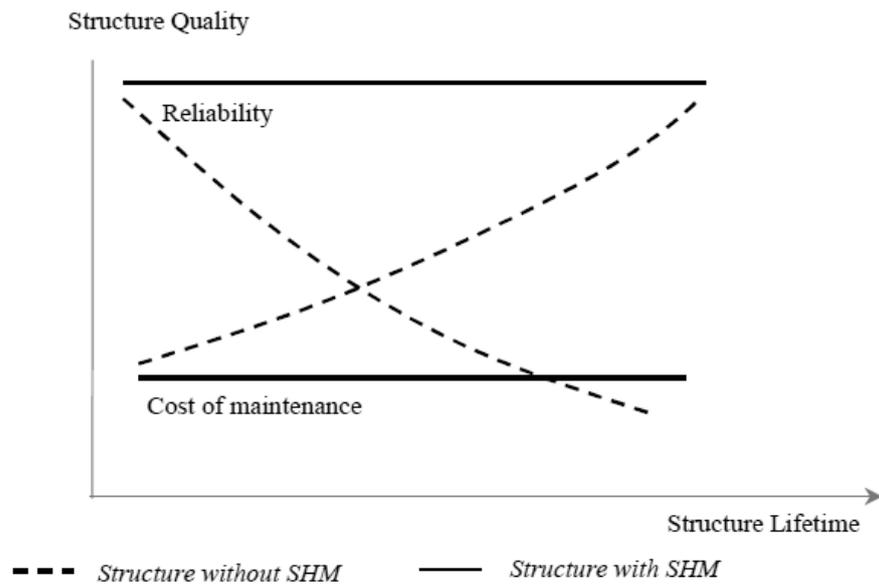


圖 2：SHM 的優點

風機葉片感測器監控材料近年來發展迅速，由早期的天然材料發展至複合材料及近年的智慧型材料，可作為結構內部控制及劣化偵測，如圖 3 所示。

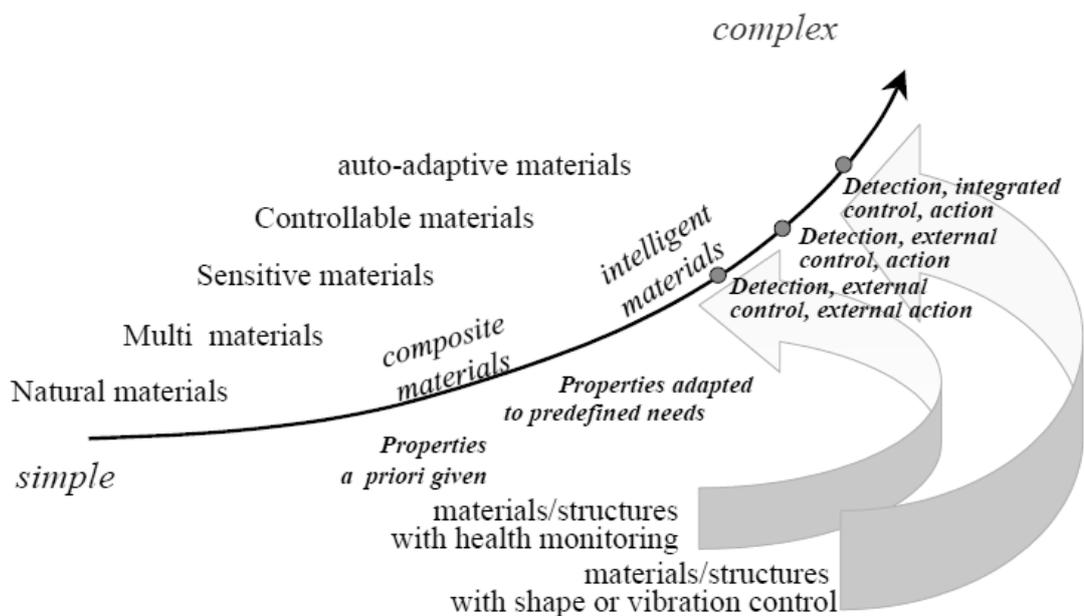


圖 3：感測器材料與結構內部控制及劣化偵測的進化

要達到 SHM 或完全智慧型結構，經由 SHM 共同的基礎和互補，形狀控制和振動控制，可經由三方向進行研發，(1)靈敏性的感測器及執行器材料；(2)感測器及執行器微型化及鑲埋技術；(3) 診斷的方法及擷取資料減量，如圖 4 所示。

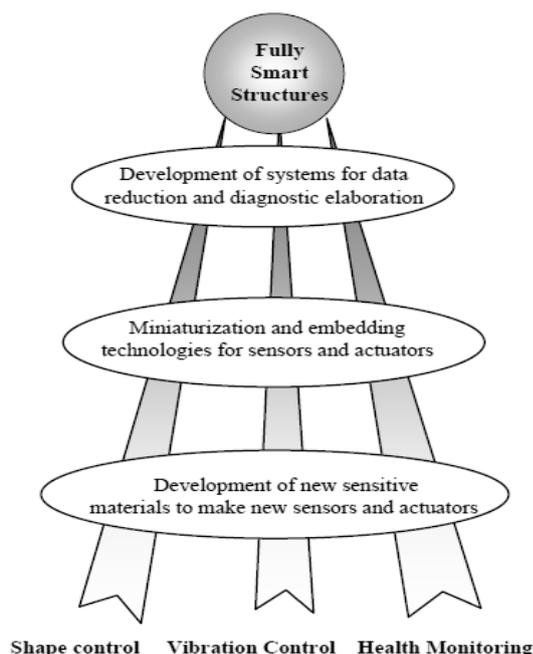


圖 4：SHM 共同的基礎和互補，形狀控制和振動控制

感測器可區分為主動式與被動式兩類，主動式感測器是不需要提供激發能量至結構體上，由結構體劣化產生的化學、物理、機械等自然現象直接判斷偵測。被動式感測器是需要提供激發能量至結構體上，透過能量激發，經由感測器接受的訊號判斷結構體的劣化，兩種形式感測器劣化判斷偵測皆需先建立劣化判斷各種訊號、頻譜的資料庫，如圖 5 所示。

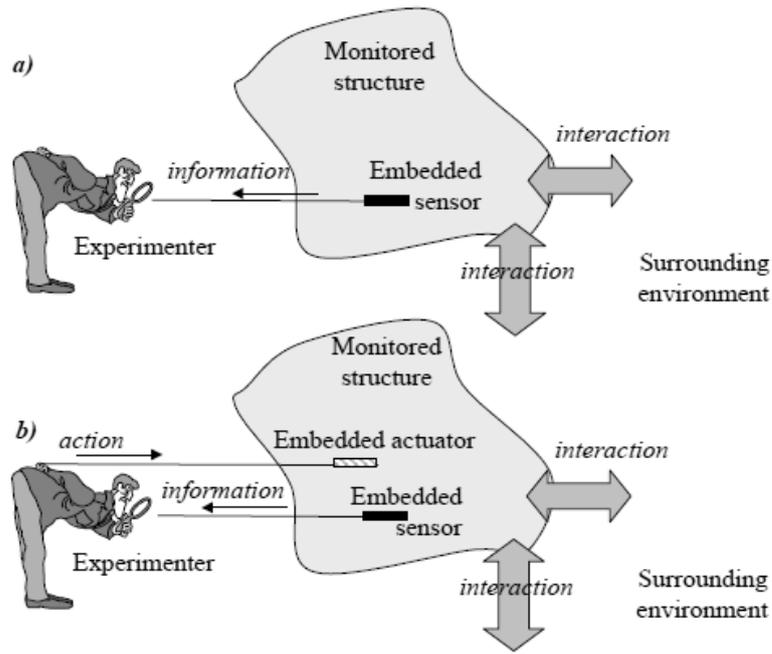


圖 5：被動式感測器和主動式感測器監測

圖 6 說明(a)為主動式音洩感測器的應用，當結構材遭受外力衝擊至損傷時的監控量測及資料擷取，(b)為被動式感測器，利用執行器產生的藍姆波為激發源，產生波形判斷經由感測器接受的劣化訊號，(c)為執行器與感測器同時結合量測劣化訊號。

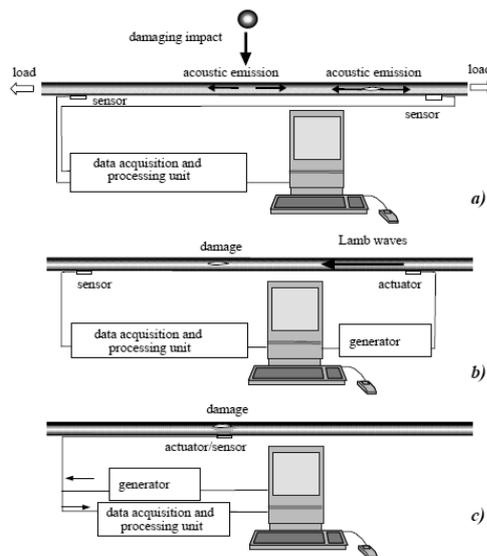


圖 6：採用主動式或被動式感測器壓電程序監測技術

SHM 的基本組成包括結構體；材料；感測器；執行器；訊號處理；監控軟體及運算，更與非破壞檢測技術結合，如圖 7 所示。

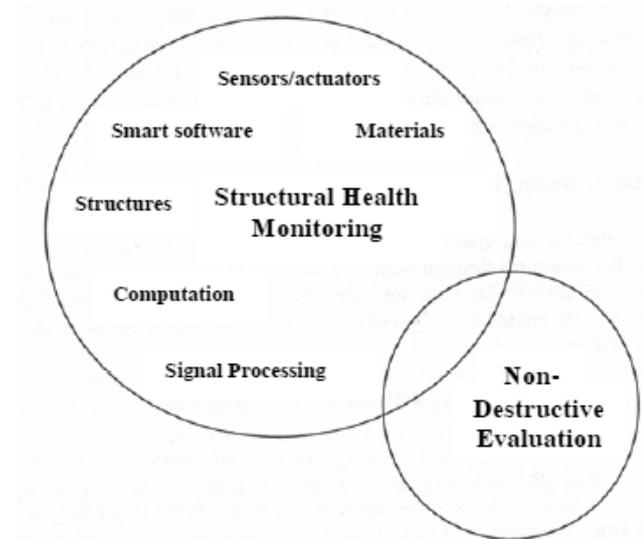


圖 7：SHM 的基本組成

SHM 與 NDE 在感測器的關連，可以圖 8 聚合物複合材料說明(a)材料劣化經由穿透或/及反射產生訊號，(b)鑲埋產生能量的執行器(PZT) 及接受能量的感測器；(c)鑲埋產生能量的執行器產生訊號，經 NDE 偵測。

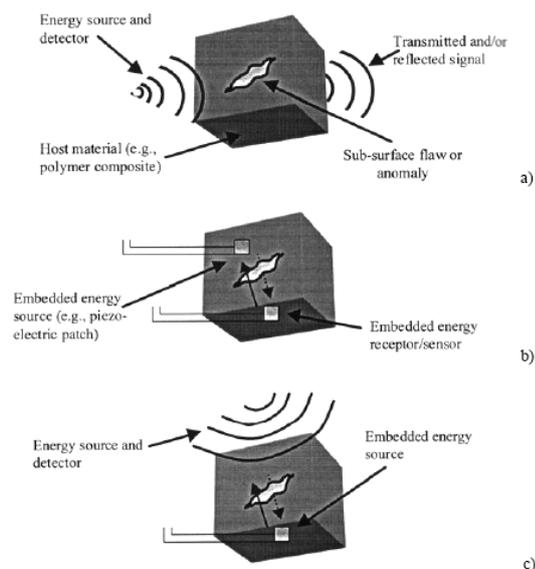


圖 8：SHM 與 NDE 的結合

表 1 詳列各程應用在主動式或被動式感測器材料的有機聚合物材及無機材料。

表 1：感測器材料的設計

| Physical effect                    | Polymers  | Materials | Inorganics   |
|------------------------------------|---|-----------|--|
| <b>Passive sensors</b>             |   |           |  |
| Piezoelectricity                   | Polyvinylidene fluoride<br>Polyvinylidene fluoride trifluoroethylene<br>Polyhydroxybutyrate<br>Liquid crystalline polymers (flexoelectricity) |           | Piezoelectric zirconate titanate<br>Zinc oxide<br>Quartz                                   |
| Pyroelectricity                    | Polyvinylidene fluoride<br>Langmuir-Blodgett ferroelectric superlattices  |           | Triglycine sulfate<br>Lead-based lanthanum-doped zirconate titanate<br>Lithium tantalate   |
| Thermoelectricity (Seebeck effect) | Nitrile-based polymers<br>Polyphthalocyanines   |           | Cu <sub>100</sub> /Cu <sub>57</sub> Ni <sub>43</sub><br>Lead telluride<br>Bismuth selenide |
| Photovoltaic                       | Polyacetylene/n-zinc sulfide<br>Poly(N-vinyl carbazole)+merocyanine dyes<br>Polyaniline   |           | Silicon<br>Gallium arsenide<br>Indium antimonide   |
| Electrokinetic                     | Polyelectrolyte gel ionic polymers  |           | Sintered ionic glasses   |
| Magnetostriction                   | Molecular ferromagnets  |           | Nickel<br>Nickel-iron alloys   |
| <b>Active sensors</b>              |   |           |  |
| Piezoresistivity                   | Polyacetylene<br>Pyrolized polyacrylonitrile<br>Polyacequinones<br>Polyaniline<br>Polypyrrole<br>Polythiophene                                |           | Metals<br>Semiconductors   |
| Thermoresistivity                  | Poly(p-phenylene vinylene)  |           | Metals<br>Metal oxides<br>Titanate ceramics<br>Semiconductors                              |
| Magnetoresistivity                 | Polyacetylene<br>Pyrolized polyvinylacetate   |           | Nickel-iron alloys<br>Nickel-cobalt alloys   |
| Chemioresistivity                  | Polypyrrole<br>Polythiophene<br>Ionic conducting polymers<br>Charge transfer complexes  |           | Palladium<br>Metal oxides<br>Titanates<br>Zirconia   |
| Photoconductivity                  | Copper phthalocyanines<br>Polythiophene complexes   |           | Intrinsic and extrinsic (doped) semiconductors   |

目前應用在複合材料脫層結構監測的感測器經 133 種結構體 SHM 的應用，以壓電感測器、電磁感測器、光纖感測器為主要，其中壓電感測器為 68%，其中以 PZT 最多，光纖感測器佔 20%，以 FBG 最多，如圖 9 所示。

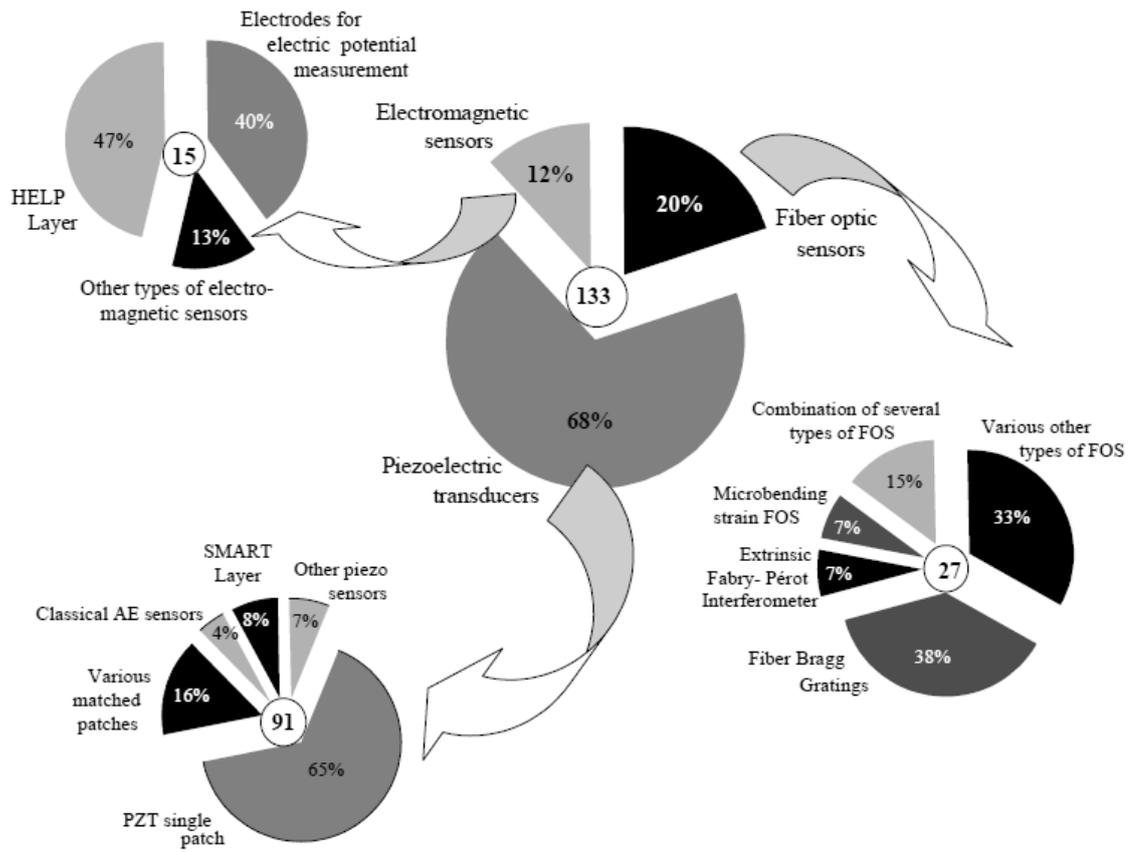


圖 9：用在複合材料脫層結構監測的感測器

## 3.2 風力發電機複材葉片結構損傷監測系統發展

近年來風力發電機複材葉片結構損傷監測系統發展，葉片生產廠商；風機系統廠商及風機研究單位仍在進行實驗室試驗階段，倘未見廠品化產品，相信最近五年內可有廠品的銷售應用。

### 3.2.1 Blade monitoring system-LM Glasfiber (2004)

LM Glasfiber 為風力發電機葉片生產廠商，在 2004 年已着手在注模新葉片時沿著 trailing edge 邊緣 2，4，6 公分分別鑲埋一般光纖，如圖 10 所示，當 trailing edge 裂開時透過不斷發出的光源訊號，經由接收端判斷光纖的斷裂、彎曲、鬼影等判斷損傷位置點的現象，如圖 11 所示，在葉片根部則鑲埋 FBG 感測器，透過位置的變化可量測應變，此外亦具溫度與雷擊偵測功能。

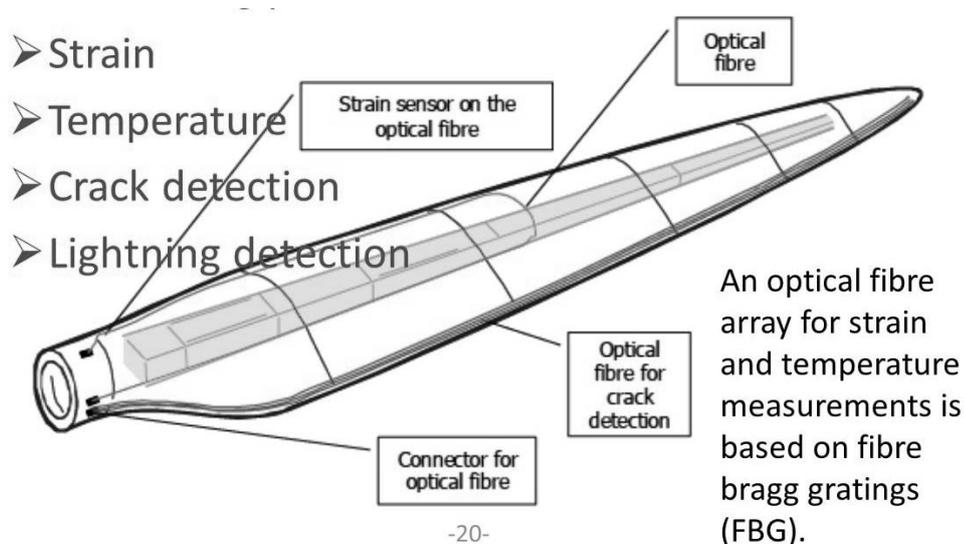


圖 10：LM Glasfiber 風力發電機葉片結構損傷監測系統

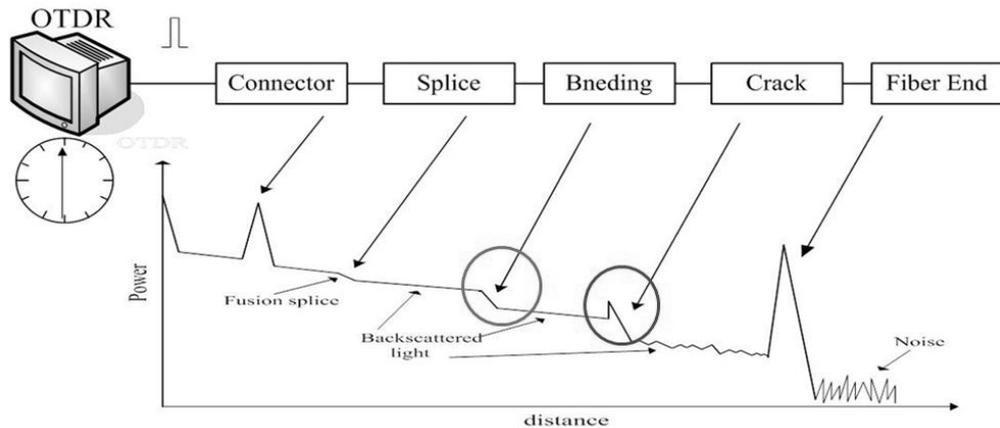


圖 11：LM Glasfiber 風力發電機葉片結構 trailing edge 裂開損傷監測

損傷監測系統感測器數目、位置、觀測點的建置，如圖 12 所示。

- 感測器數目：指定的光纖應變感測器的位置。通常情況下，適用於 4-8 應變傳感器。
- 感測器位置：這是在這兩個 flapwise 和 edgewise 應變感測器定位的位置，通常情況下，應用 2-4 感測器位置。
- 觀測點：基於葉片設計，整個葉片上的每個觀測點區域，可以定義一個 edgewise 和 flapwise 觀測點。LM 模型計算從感測器和系統參數值一個觀測點的應變，最大每個葉片可以被定義為 20 個觀測點。
- 觀測點區域：基於葉片設計，觀測點區域（LM 模型）可以被定義為一個截面上的任何地方從根到尖的葉片，經由觀測點區域 LM 模型以感測器區域和系統參數的值計算 flapwise、edgewise 及離心的動量，每支葉片可以被定義為最多 10 個觀測點區域。

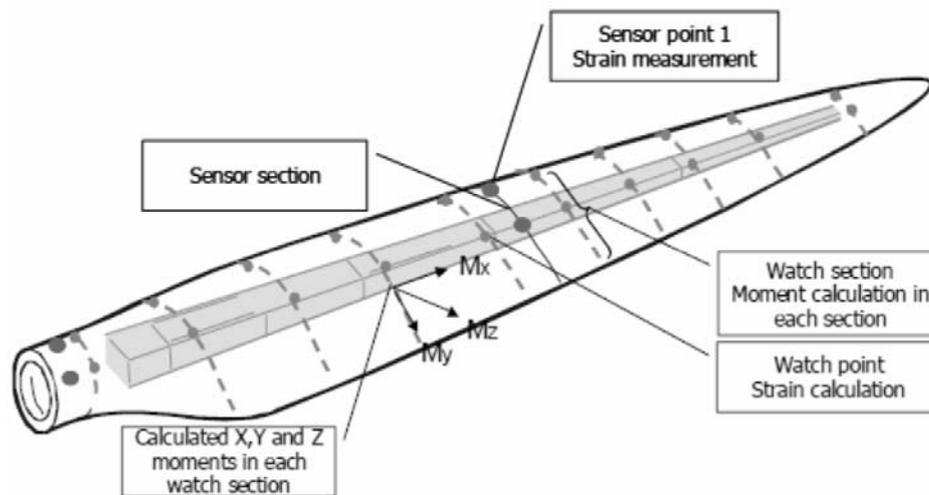


圖 12：損傷監測系統感測器數目、位置、觀測點的建置

### 3.2.2 Blade monitoring system-01dB-Metravib, Areva (2008)

法國 Areva 公司在 2008 年提出以光纖感測器量測風機轉子上葉片荷重、動能、疲勞、殘餘壽命及共振頻率，脫層、脫膠及損傷等項目，光纖感測器佈置如圖 13 所示。

#### Rotor Condition Monitoring - Available Information From Blades

- Blade parameters include
  - Strain
  - Bending moments
  - Load histories and extreme loads
  - Accumulative fatigue and residual lifetime
  - Resonant frequencies – debond and delamination, icing and damage
- Rotor parameters include
  - Rotor imbalance
  - Detection of fouling
  - Rotor speed
  - Aerodynamic input power (efficiency and comparison between machines)
  - Thrust forces on tower
- Drive train parameters include

- Yaw and tilt moments
- Resultant load vector
- Drive torque and impulses

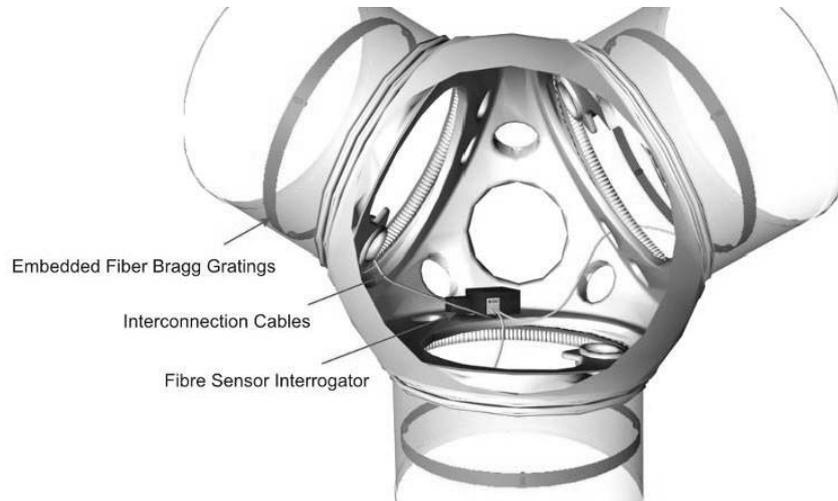


圖 13：光纖感測器量測風機轉子上葉片的相關性能

光纖感測器是目前正在安裝在風機轉子上，並作為獨立變速控制葉片  
 載荷測量（IPC）應用最佳解決方案的感測器，如圖 14 所示。

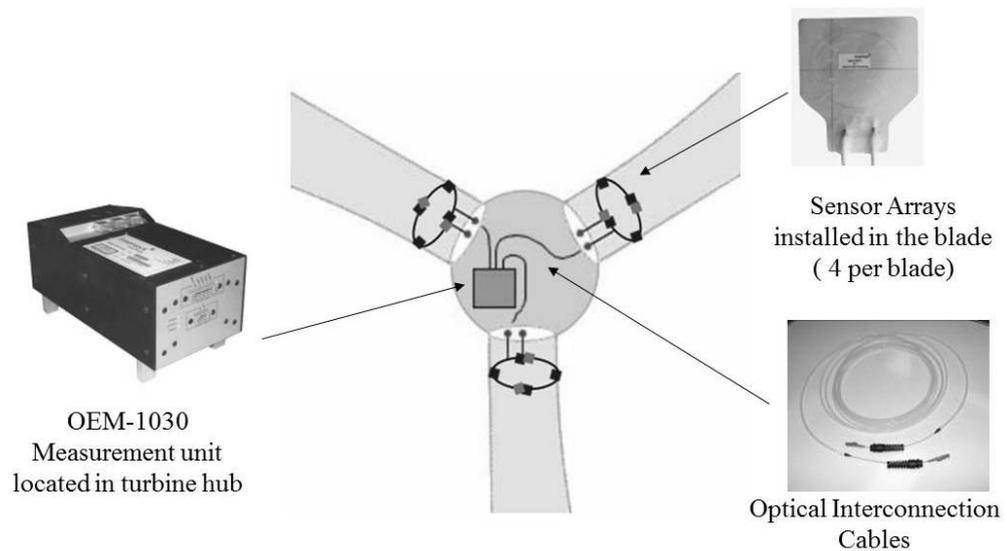


圖 14：安裝在風機轉子上的光纖感測器及資料擷取

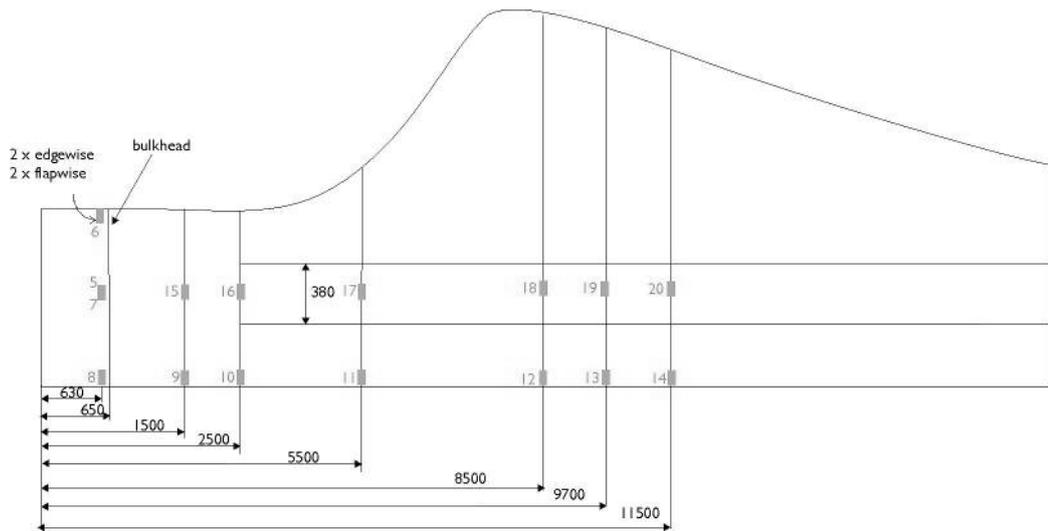


圖 15：感測器的測試安裝



圖 16：在實體葉片上安裝 FIBRADAPT 感測器的測試

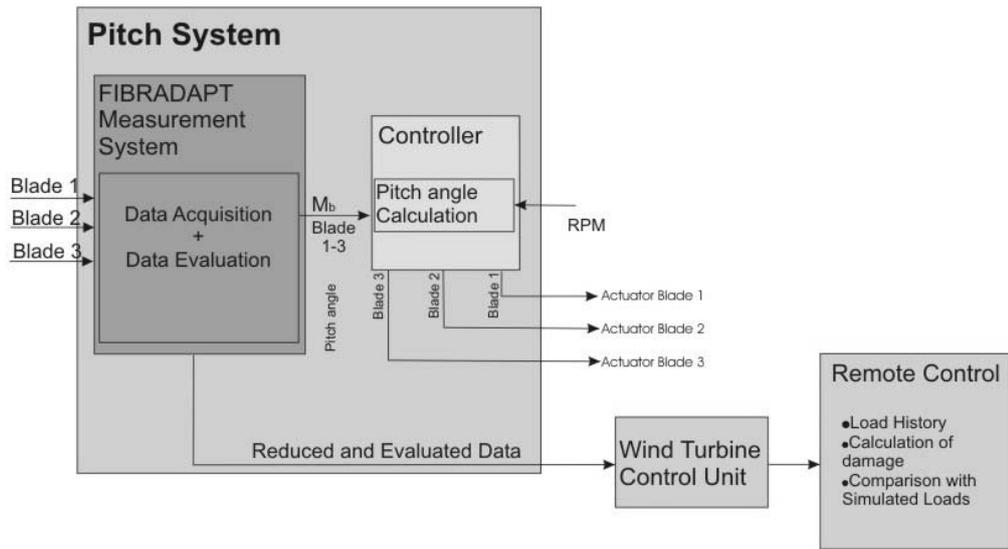


圖 17：Areva 公司葉片監控系統

- 大容量的數據收集葉片使用狀況
- 提供運營商需要的數據進行審查和分析
  - 10 分鐘區域的數據被處理成幾個匯總值
  - 所有原始數據和推導測量的數據進行統計分析
  - 最大值、最小值及平均值

如圖 18 為監控轉子動能量測的案例。

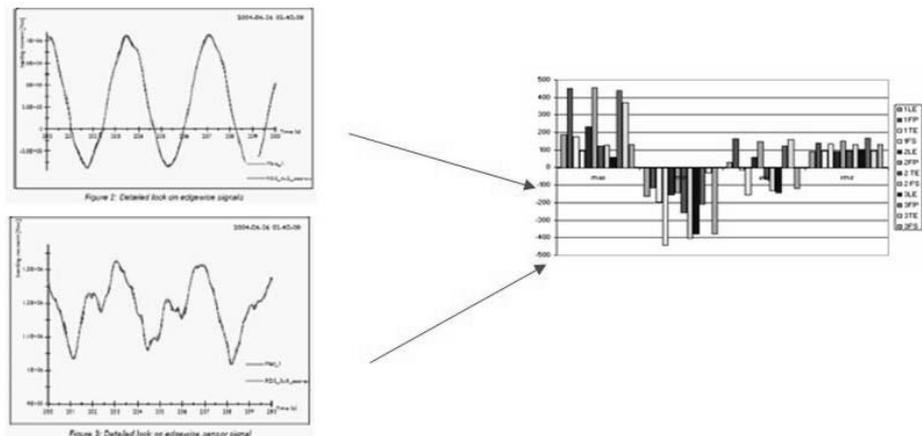
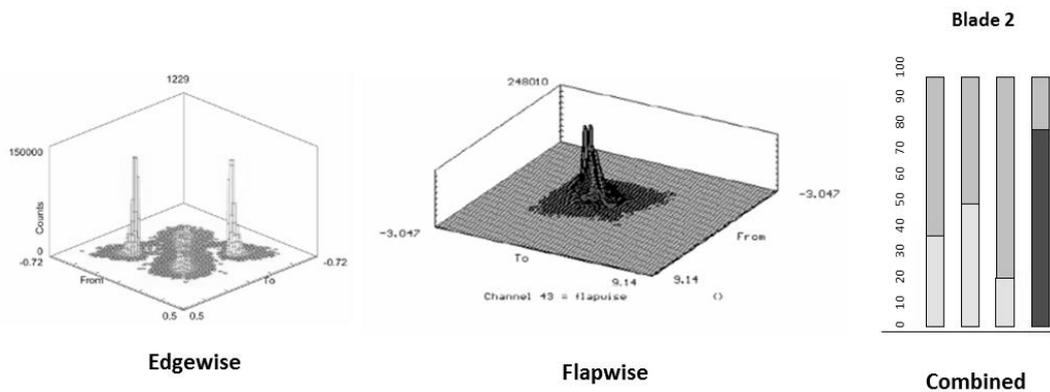


圖 18：為監控轉子動能量測的案例

- 受力狀況以 Rainflow counting 表示
- 計算每支葉片根部 4 個位置的疲勞
- 疲勞累積、損傷速率及殘餘壽命的連續更新
- 對下列狀況發出警訊
  - 高損傷速率事故
  - 低殘餘壽命
  - 改善維修及偵測程序

轉子的監控-葉片疲勞及殘餘壽命的計算



- 葉片使用狀況時的 Flapwise 及 edgewise 動能

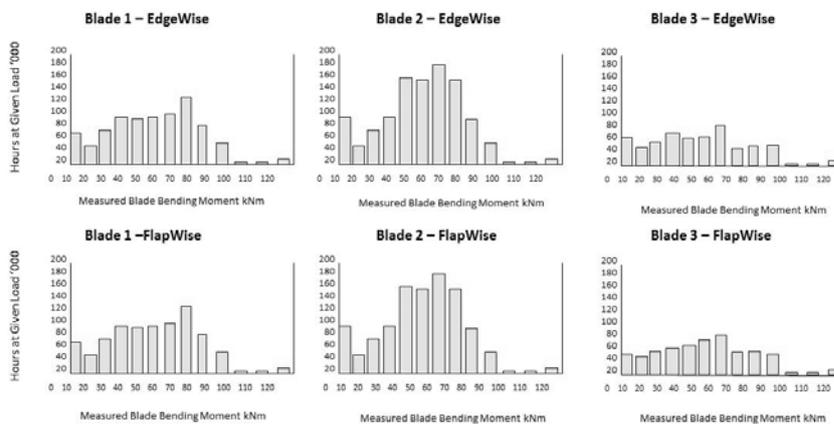


圖 19：葉片使用狀況

- 受力狀況以 Rainflow counting 表示
- 葉片疲勞累積貯存在 Insensys 儀器設備內
- 計算每支葉片根部 4 個位置的疲勞
- 每支葉片 4 個累積疲勞值會連續更新減低資料傳輸及貯存的需求

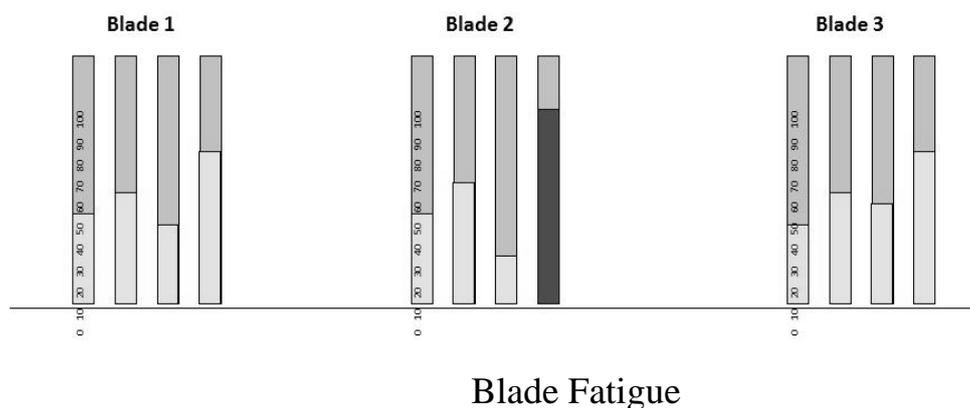


圖 20：每支葉片 4 個累積疲勞值發出低殘餘壽命的警示

### 3.2.3 Smart Sensor System for Structural Condition Monitoring of Wind Turbines-National Renewable Energy Laboratory -NREL (2006)

2006 年美國國家能源實驗室發展以 PZT 為感測器的智慧型風力發電機結構監測

- 它由串聯連接的壓電陶瓷 (PZT) 的節點的神經元，並安排連續感測器的概念
- 一個脈衝負載模擬玻璃纖維面板的中心，以代表纖維裂痕或葉片受到衝擊的影響

- 模擬時使用的面板是  $1.22\text{m}^2$ ， $0.0064\text{m}$  厚，而且是作為簡單支撐，  
 $10 \times 10\text{ m}$  的中央神經網路系統 Structural Neural System (SNS)
- 面板上的節點的安排是完全對稱的，在每個神經元的信號，處理電子顯示為一個小盒子，這些單位產生的每個神經元的輸出電壓，被指定的電壓  $V1$  通至  $V20$

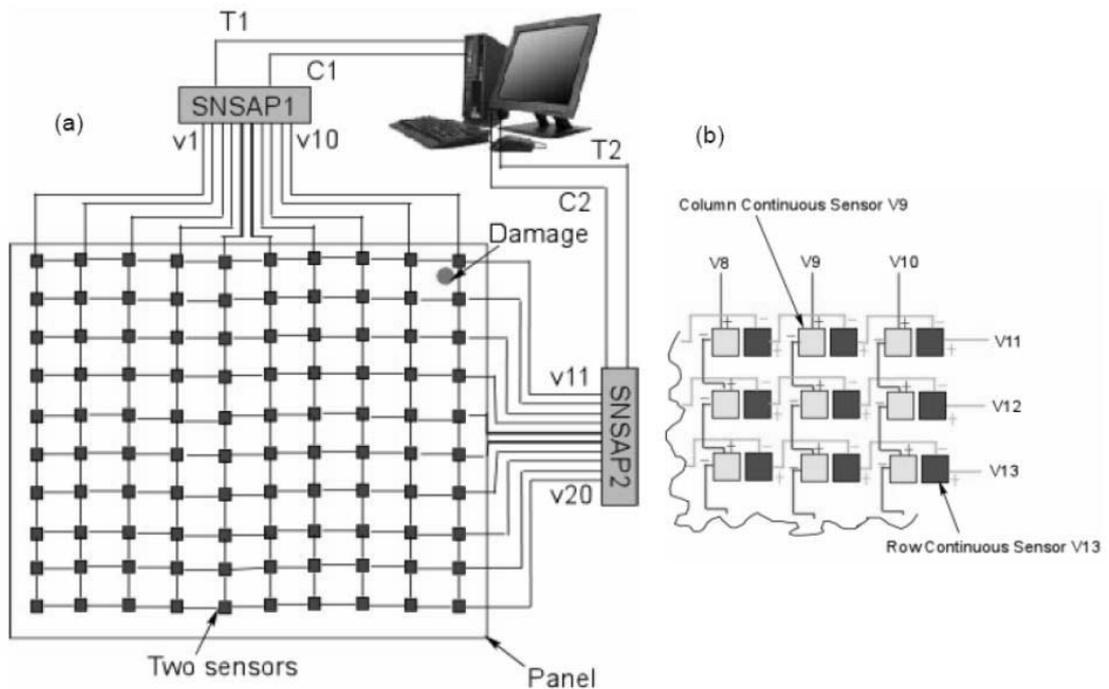


圖 21：中央神經網路系統的建構

測試風力發電機葉片上的 SNS 原理，SNS 的 4 神經元鑑定為  $V1$ ， $V2$ ， $V3$  和  $V4$ ，損害是預測在位置 1 至 5

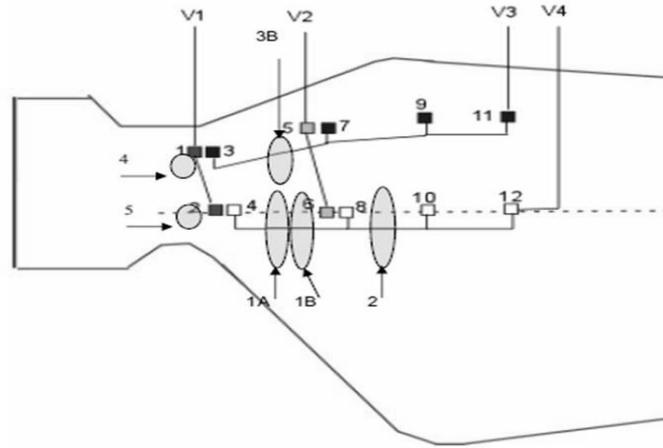


圖 22：風力發電機葉片上的 SNS 4 為 V1，V2，V3 和 V4 為神經鑑定元，位置 1 至 5 是損害預測

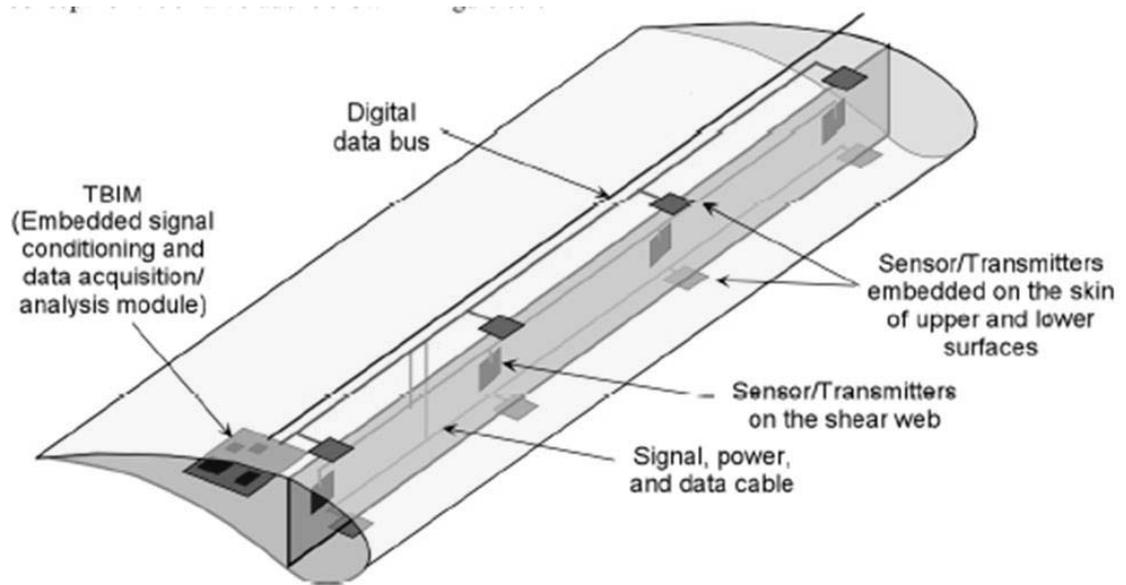


圖 23：智慧型風力發電機結構監測設計

- 測試的基礎上，美國國家能源實驗室建議改善風力發電機葉片上 SNS 的應用，包括使用一個神經元的細格子圖案，在關鍵位置，如肋骨和關節定位葉片內的神經元，並設置基礎上的神經元發射參數下面的每一個神經元的結構，以幫助查明損害地點

- 有幾個 SNS 硬件升級的技術，可以作為後續項目的發展，增加神經元的數目，以監測大型結構，SNS 的無線傳輸數據從一個旋轉系統的到固定型式
- 在未來的 SNS 也可以為其他風力機組件的健康監測重新配置，如軸承和齒輪

風力發電機組感測器改善的建議，包括下列三項

- 新型風力發電機組狀態監測 MEMS 感測器(WIND ENERGY 2010)
- 金屬材料和複合材料的非破壞檢測
- 複合材料葉片的先進材料系統和維修技術的發展

### 3.3 MEMs 在風力發電機複材葉片結構損傷監測的應用

風力發電機組的損害評估和預後的方法詳如表 2 所示。

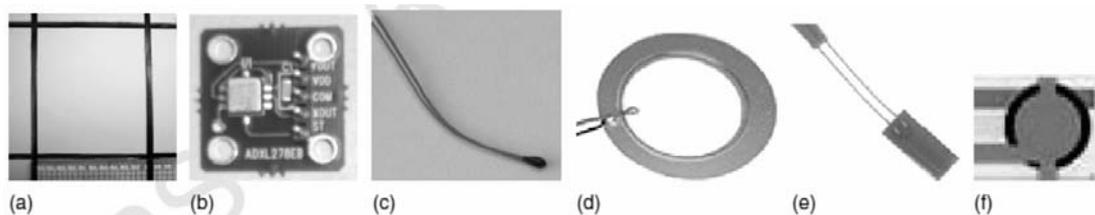
表 2：風力發電機組的損害評估和預後的方法

| Method                      | Sensor/ actuator type                  | Description of the method   |
|-----------------------------|--|---|
| Vibration                   | Accelerometer, piezo, or MEMS          | The natural frequencies of the blade can be monitored for changes indicating damage. Small damage is difficult to detect  |
| Strain                      | Foil strain gauge or fiber-optic cable | Strain can be monitored at critical points in the blade and other components. It is difficult to measure strain inside the composite and to have enough gauges to detect small damage. Fiber-optic Bragg gratings can provide a large number of low-bandwidth strain measurements. (Passive method)       |
| Ultrasonic wave propagation | Piezoelectric wafer                    | Good for monitoring uniform sections or hot spots. Need predamage reference data that may vary owing to environmental changes or sensor aging. Can detect damage when the blade is operating or not operating. Commercial systems are well along in development for several applications. (Active method) |

| Method                         | Sensor/ actuator type                      | Description of the method   |
|--------------------------------|--|---|
| Acoustic emission conventional | AE wideband barrel sensor                  | Can detect damage in complex structures. Fretting can cause false indications of damage and the turbine must be operating. Sensors are large and many are required. Fast multiplexing is simplifying the hardware requirements. MEMS AE sensors are reducing size and weight of the system. (Passive method.)   |
| Structural neural system (SNS) | Piezoelectric wafers or other sensor types | Overcomes problems of conventional AE by using piezoelectric wafer sensors and biomimetic highly distributed massively parallel signal processing. Multistate sensors (nanotube thread, pressure, temperature, etc.) can also be used. (Passive method.) Active SNS has also been tested and uses a simple method of neuron firing to detect damage in the passive and active systems |
| Nanosensors                    | Electronic particle                        | This future approach uses small particles embedded in the blade during the fabrication process. The sensors are transceivers that reflect an RF signal which changes owing to very local Damage   |

### 連續傳感器技術的最新進展

- 通用 SNS 可以使用幾乎任何類型的被動感測器，包括：AES 的壓電陶瓷片監測裂紋擴展，碳納米管（CNT）的神經元（線程或薄膜）監察應變及大裂縫。
- SNS 在結構上的應用，可以檢測出損傷，如複合纖維破斷，撞擊損壞時的傳遞。
- 擴展的 SNS 在連續多態感測器的實用性



可用於連續的感測器如上述(a)~(f) 單元感測器

- a. SNS 納米管的阻抗薄膜感測器，可檢測腐蝕，裂痕及脫層
- b. 在電路板上的 MEMS 加速度計
- c. 一個連續的溫度感測器的熱敏電阻器
- d. 背面黃銅 PZT 商品晶圓的檢測聲發射
- e. 應變規感測器
- f. 壓力映射感測器

### MEMS 電容式加速度計

- 加速度計兩軸，和測量在平面的加速，四個加速度計被用來形成一個連續的加速度計與四個輸入和一個在 X 軸的輸出，第二個連續四個輸入和一個 Y 軸輸出加速度
- 這些加速度計的工作基於一個 MEMS 懸臂式電容
- 加速計需要修改電路形式的不斷總結和放大信號的傳感器和防止低頻信號饋通
- 開放使用連續的 MEMS 加速度計測量振動、衝擊、軸承不平衡及損傷監測

### 無線 MEMS 加速度計在 SHM 的旋轉系統

- 目前使用於結構的分析和監測研究的現有加速度計和數據擷取系統較繁瑣
- 內置加速度計系統集成感測器技術，從 Micro Strain Inc. 的商業 MEMS

加速度計 (ADI 公司 ADXL278) .

- 無線測量系統可安裝在一個旋轉的風力發電機，而不被拴在任何外部設備或計算機
- 無線系統不可存儲很多局部數據，但似乎適合風力發電機使用，電池壽命是受到限制，但葉片振動可提供於電池進行充電的電力
- SNS 可以採用無線傳輸系統

表 3：適合風機葉片結構損傷監測裝置的感測器

| <b>Embedded</b>            | <b>Bonded onto blade</b> |
|----------------------------|--------------------------|
| Fiber optics               | Foil strain gages        |
| Foil strain gages          | PVDF sensors             |
| Thermistors                | Fiber optics             |
| Thermocouples              | Humidity                 |
| PVDF piezoelectric sensors | Accelerometers           |
|                            | Through transmission IR  |

表 4：適合風機葉片結構損傷監測裝置的各種感測器

| <b>What to Sense</b> | <b>Why to Sense</b>                       | <b>Strain Gage</b> | <b>Optical</b> | <b>MEMS</b>          |                       |
|----------------------|---|--------------------|----------------|----------------------|-----------------------|
|                      |   |                    |                | <b>Piezoelectric</b> | <b>Piezoresistive</b> |
| <b>Strain</b>        | <b>Composite failure</b>                  | <b>X</b>           | <b>X</b>       | <b>X</b>             | <b>X</b>              |
|                      | <b>Monitor blade stress</b>               | <b>X</b>           | <b>X</b>       | <b>X</b>             | <b>X</b>              |
| <b>Vibration</b>     | <b>Vibration absorption</b>               |                    | <b>X</b>       | <b>X</b>             | <b>X</b>              |
| <b>Pressure</b>      | <b>Wind pressure</b>                      | <b>X</b>           | <b>X</b>       | <b>X</b>             | <b>X</b>              |
|                      | <b>Air flow</b>                           | <b>X</b>           | <b>X</b>       | <b>X</b>             | <b>X</b>              |
|                      | <b>Natural wind frequencies/gusts</b>     | <b>X</b>           | <b>X</b>       | <b>X</b>             | <b>X</b>              |
| <b>Impact</b>        | <b>Hail/Rain intensity</b>                |                    | <b>X</b>       | <b>X</b>             | <b>X</b>              |
|                      | <b>Natural wind frequencies/gusts</b>     |                    | <b>X</b>       | <b>X</b>             | <b>X</b>              |
| <b>Acceleration</b>  | <b>Wind loading vs. energy generation</b> |                    |                | <b>X</b>             | <b>X</b>              |
|                      |   |                    |                |                      |                       |

## 四、心得與感想

台電公司的風力機組，目前並無安裝葉片結構損傷監測系統，缺乏風對葉片的荷載量測資訊，一般葉片破壞只能採目視或停機檢修，導致嚴重破損、停機維修工期長，無法即時了解葉片受到複雜氣動荷載的作用，引致環境對材料(粘結層剝離、纖維斷裂、積層脫落)及結構(應變、疲勞累積、殘餘壽命)的破壞影響加劇，葉片斷裂，更會導致轉子不平衡，葉片衝擊塔架，嚴重損壞風機的傳動系統。因比發展葉片監控及量測技術，能即時線上監控和預警葉片材料缺陷和損傷位置、程度等。

風力發電機複材葉片結構損傷監測系統需能提供風機葉片損傷位置和持續破壞的關鍵信息，在葉片產生破損前提供預防性維修。大幅度提高葉片複合材料構件的品質，避免葉片複合材料在使用過程中所造成的嚴重事故和延長葉片結構的使用壽命。

目前以 MEMS 及光纖感測器配合中央神經系統應用在新型風力發電機組狀態監測較為可行，此外尚需配合金屬材料和複合材料的非破壞檢測技術，偵測後的複合材料葉片的先進材料系統和維修技術的發展才可解決葉片監測與修護一體。