풍력발전 감시 기술

한국과학기술정보연구원
전문연구위원 신효순
(0637shin@reseat.re.kr)

1. 개요

풍력에너지를 위한 수요가 기하급수로 증가하면서 운영 및 정비(O&M: Operation & Maintenance) 비용 감소와 신뢰성 향상이 풍력터빈 정비 전략에 최우선 순위가 되었다. 가용성을 향상시키기 위해 보다 진화된 풍력터빈 설계를 개발하는 것 외에도 신뢰할 수 있고 비용효율적인 상태 감시(CM: Condition Monitoring) 기술을 적용하면 이러한 목표를 효율적으로 달성할 수 있다. 전통적인 발전소와 달리 풍력발전은 가혹한 바람, 열대성 기후, 번개, 북극 지방의 추위, 우박 및 눈을 포함한 매우 변동이 심하고 혹독한 기상 상태에 노출된다. 그 결과 풍력터빈 비가동률이 풍력터빈 수명의 3%에 이르고 O&M 비용은 풍력 프로젝트의 총 에너지 비용(COE: Cost of Energy)의 10~20% 수준이고 수명에 가까워서는 풍력터빈의 35%에 도달할 수 있다.

고장 발생을 방지하는 예방 중심의 유지보수 전략이 이들 비용을 상당히 줄일 수 있다. 그러므로 풍력터빈은 가능한 장비 수명까지 신뢰성과 비용효율성이 높은 전력을 안정적으로 공급하기 위해 높은 수준의 정비가 필요하다. 풍력터빈 산업에서 정비전략을 결정하기 위한 첨단 방법은 성능과 매개변수 감시 및 후속 조치에 근거한 예방 정비로 구성된 신뢰성 중심 정비(RCM: Reliability Centered Maintenance)이다. 이 전략에 CM이 교정과 정기 정비 전략 사이에서 최적점을 결정하는 데에 사용된다.

2. 풍력터빈 블레이드의 감시 기술

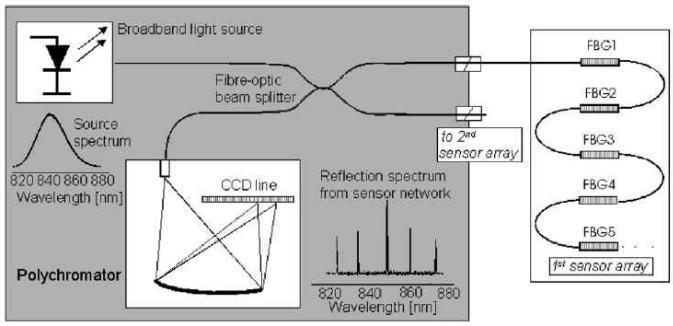
2-1. 섬유 격자 센서 시스템

2-1-1. 작동 부하 감시

로터 블레이드(rotor blade)에 변형률 센서를 사용한 부하 감시는 블레이드의 부하 이력에 대한 추가 정보를 제공하는 장점이 있고 결과적으로 로터 블레이드의 수명을 추정할 수 있다. 번개에 대한 안전과 전자기 간섭에 대한 중립성 때문에 광섬유 변형률 센서는 풍력터빈 구조물 감시에 유리하게 적용된다. 광섬유 변형률 센서의 넓은 범위 중에 섬유 브래그 격자(FBG : Fibre Bragg Grating)는 측정된 파장과 변형률 사이에 직접적인 물리적 상관관계를 갖는 장점을 가지고 있다. 파장 부호로 처리된 센서 신호는 전송선에 영향을 받지 않고 확장된 센서망의 다중 처리화가 매우 적은 광섬유회선을 따라 공간부하 분포의 결과를 제공한다. 풍력터빈에서 센서 시스템은 매우 높은 내구성이 요구된다. 센서는 20년 이상의 예상 수명기간 동안

꾸준한 회전, 진동, 기계적 충격, 전자파 및 환경 온도변화에 의해 영향을 받아서는 안 된다. 실시간 변형률의 프로필을 얻기 위하여 모든 센서의 변형률상태 샘플링의 정확한 동시성이 보장되어야 한다. 이들 요구사항을 만족하기 위하여 설계된 FBG 측정 시스템이 4.5MW 풍력터빈의 53m 길이 로터 블레이드를 감시한다.

FBG 센서망은 파장 다중 처리화 되고 네트워크에서 각 센서의 브래그 파장이 센서 망 반사 신호의 광역 스펙트럼 조도와 분광계의 판독을 이용하여 측정된다(<그림 2-1>).



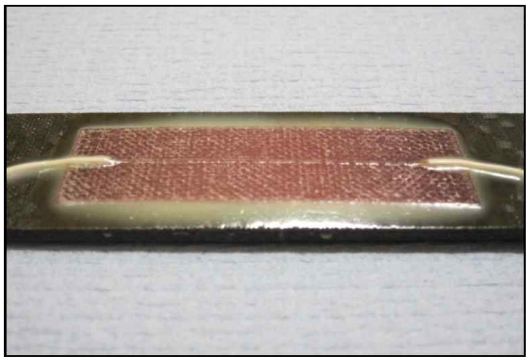
<그림 2-1> FBG 신호처리 장치[2]

스펙트럼 판독 원칙에 근거한 다색 광원기가 네트워크에 있는 모든 센서를 동시 처리하고 진동 변형률 방식의 순간 상태를 제공한다. 절대 변형률의 정확도는 분광계의 장기적 안전성에 영향을 받는다.

2년 이상의 현장실험 중 적용된 광섬유 센서 기술을 평가했다. 2 센서 시스템이 전 실험 기간(각각 4측정/s와 50측정/s로 약 1년)에 걸쳐 작동 중인 풍력터빈의 실질적 환경조건 하에서 연속적인 부하 감시 결과를 전송한다. 블레이드 변형률 데이터의 실시간 가용성은 블레이드의 안전성 감시와 능동적 안전성 제어 및 전체 터빈의 부하 감시에 사용된다. 누적된 변형률 데이터는 블레이드 재료를 위한 진단 도구로서 피로부하의 추적과 풍력단지 특성화를 위해 사용된다.

2-1-2. 현장 배치용 섬유 Bragg 격자 변형률 패치

장기간 고변형률 응용을 위하여 특별히 적용되는 섬유 브래그 격자 변형률 패치가 개발되고 특성화 되었다. 패치의 설계 개념은 유리섬유강화 플라스틱 캐리어 재료에 근거한다. FBG를 캐리어 재료에 결합하기 위해 개발된 개념은 FBG 센서를 복합구조물에 신뢰성 있게 결합하는 절차에서 파생되었다. 패치의 온도 민감성, 변형률 계지계수, 섬유 매트릭스 계면 접착력 및 피로거동이 특성화되었다. 그 결과 선형 온도, 변형률 거동 및 피로저항을 갖는 FBG 변형률 패치가 개발되었고 풍력터빈 발전기의 고급 복합재료를 위한 감시시스템의 일부로 사용될 수 있다. 동적 부하를 위해서는 섬유가 고장 없이 높은 동적 하중에 견디기 위해 폴리이미드나 Ormocer®로 코팅되어야 한다. <그림 2-2>는 CFRP 시편에 적용된 센서 패치를 보여준다.

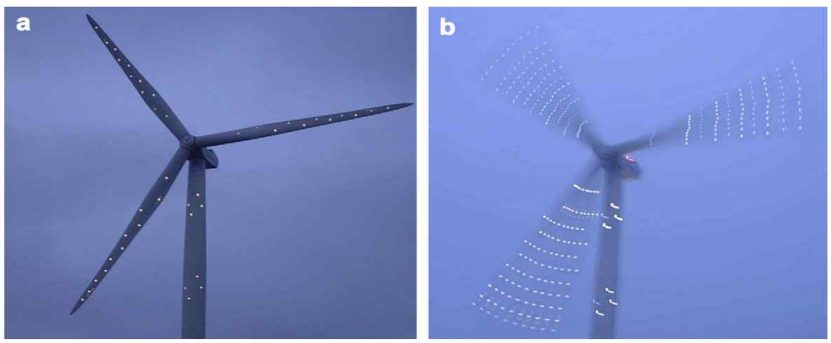


<그림 2-2> CFRP 시편에 적용된 센서 패치[3]

2-2. 사진측량법 기반 대형 풍력터빈 감시

실용적인 블레이드의 전 면적 변형과 변형률을 측정할 수 있는 광학기반 감지 시스템이 전통적 계기와 관련된 시간과 비용을 상당히 감소시킬 수 있다. 풍력터빈 블레이드의 표면에 걸친 3차원 디지털 이미지 연관기법(3DDIC: 3 Dimensional Digital Image Corelation)과 3D 점 추적(3DPT: 3 Dimensional Point Tracking) 접근법을 평가했고 동적 공간 데이터를 이용한 다중 카메라 측정 시스템이 제안되었다. 이 접근법의 장점은 매우 큰 면적에 걸쳐 분산된 전 영역 측정과 장시간의 배선과 고가의 센서를 배제할 수 있는 점이다.

카메라와 고강도 LED(Light Emit Diode) 기반의 플래시가 중앙 PC에 동기화된다. 이 중앙 PC가 데이터 획득 시스템, 카메라, 신호 촉발 및 플래시에 전달된 전력 사이의 모든 통신을 제어한다. 측정 샘플링 주파수는 예상되는 진동의 주파수 범위(0.3~5Hz)와 비교해 충분한 28Hz이다. 사진 측량법은 추적될 목표물에 붙일 표지(mark)가 필요하다. 이 표지들은 목표물의 반사도를 증가시키고 더 좋은 가시성을 제공하기 위하여 배경 재료보다 1000배 더 반사적인 역 반사체로 만든다. 이들은 매우 얇은 스티커 형으로 되어 있어 블레이드의 공기역학적 성질에 영향을 주지 않는다. 터빈에 최종 표지 분포가 <그림 2-3>에 나타나 있다.



<그림 2-3> 풍력터빈의 블레이드의 표지 레이아웃[4]

회전 평면을 결정하는 첫 단계는 회전 중심의 결정이다. 로터에 있는 표지가 원형 경로 위를

움직이기 때문에 이는 표지가 이동한 경로를 관찰하여 최소 제곱법 알고리즘을 사용하여 쉽게 이루어진다. 회전 중심과 평면의 계산 후에 강체 보정이 측정된 실제 변형 벡터에 적용된다. 추적되도록 선택된 표지는 블레이드의 한 사이클 동안 매우 큰 변위를 나타낸다. 로터의 강체 운동에서 오는 변위 성분은 데이터의 보다 좋은 가시화와 설명을 위해 각 표지의 측정된 실제 변위에서 뺀다. 따라서 아래 표시한 결과는 회전 영향을 포함하지만 이들은 풍력 부하 작용하의 고정된 터빈 진동에서 측정된 것처럼 평가될 수 있다. 서로 다른 5개의 측정된 상대 변위의 최대 진폭이 <표 2-1>에 표시되었다.

<표2-1> 측정을 통한 팁 표지를 위해 계산된 면내 변형값(M)[4]

	M1	M2	M3	M4	M5
블레이드 1-팁 표지(mm)	659	605	670	1024	1005
블레이드 2-팁 표지(mm)	617	594	703	895	898
블레이드 3-팁 표지(mm)	576	695	699	1007	961

무작위 부품의 좌표 측정 오류는 ±5mm 또는 시계의 1/16,000 범위이다. 예측되는 변형의 진폭(<표 2-1>)에 비교하면 이 정확도는 높다. 초기 결과는 터빈의 변형이 220m의 측정 거리에서 ±25mm의 평균 정확도로 측정될 수 있다. 지난 10년에 걸친 발전으로 더 높은 해상도, 더 민감한 카메라와 효율적인 소프트웨어 개발을 통해 사진 측량술이 풍력터빈의 건전성 감시와 동적 입증을 위한 다용도의 비용효율적인 기술이 될 것이다.

2-3. 음향 방출 기술

2-3-1. 무선 센서 망을 사용한 음향 발생원의 위치 파악

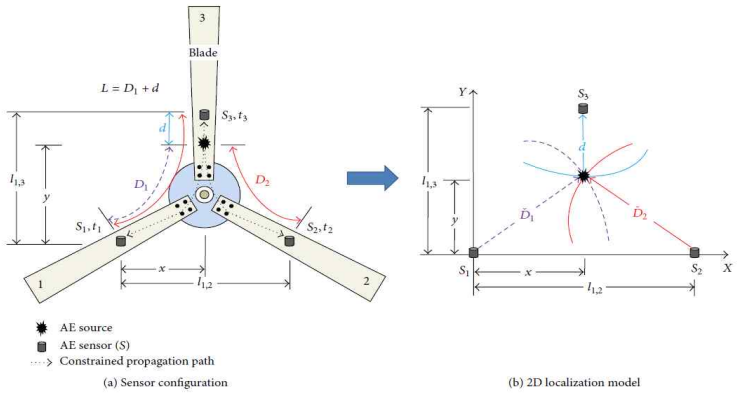
해상 풍력터빈은 외딴 지역에 위치하여 접근하기 어렵다. 결함으로 인해 심각한 정지 시간이 발생할 수 있어 비용이 많이 든다. 이러한 과제를 해결하기 위해 터빈은 지속적인 구조물 건전성 감시(SHM: Structure Health Monitoring) 시스템으로 신속한 정비가 가능하다. 풍력터빈에 SHM 기술을 결합해 운영하면 정비 비용을 최소화시킬 수 있다. 풍력터빈에 대한 현장 접근법은 터빈가동 중 결함 감지에 도움이 되는 과제를 해결하는 데 핵심적인 역할을 담당하므로 더 이상의 손상이나 고장을 방지하기 위해 적절한 조치를 취할 수 있다. 무선 수동(wireless passive) 검사 기술은 현장감시를 위한 보다 적절한 해결책이 될 수 있다. 견고한 연속적인 온라인 SHM 시스템 개발을 위해 적절한 수동 기술의 선택과 여러 기술의 결합이 중요하다. 무선센서 네트워크(WSN: Wire Less Sensor Networks)와 음향 방출(AE: Acoustic Emission) 기술의 결합을 기반으로 한 풍력터빈 블레이드의 현장 SHM 시스템이 제안되었다.

AE는 풍력터빈 작동 중에 바람하중 아래서 구조물의 결함 조사가 가능하다. 또한 대부분의 블레이드 결함 원인인 균열 개시, 성장, 균열 개구 및 폐쇄가 AE 파에 의해 탐지가 가능하다.

WSN은 AE 감지 데이터를 원격제어장비에 전송한다. 이들 두 기술의 결합은 많은 수의 풍력터빈 블레이드를 완전히 커버하기 위해 상당수의 AE 센서의 배치가 필요하고, 제안된 센서가 계속해서 블레이드 구조 상태를 감지할 수 있어야 하고 데이터 전송과 메모리 공간에서

WSN의 과부하를 야기한다.

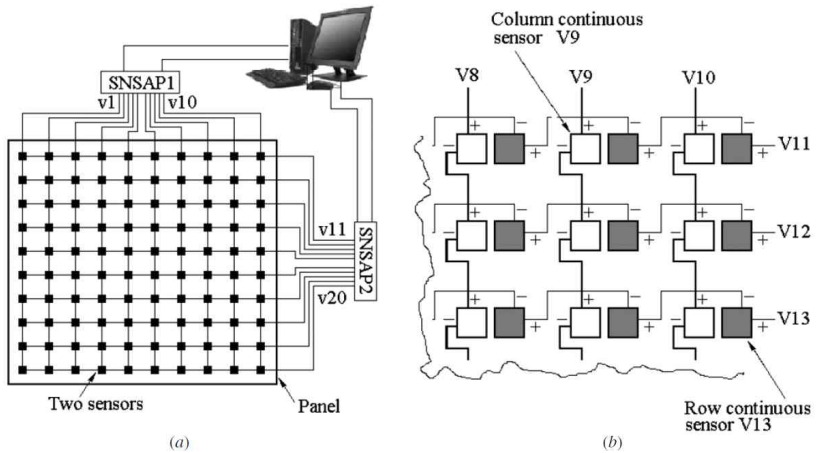
따라서 새로운 감시 시스템은 음향 신호 획득 시 낮은 샘플링 속도를 활용하여 터빈 블레이드의 감시 과정 중의 데이터를 상당히 줄일 수 있다. 300W 풍력터빈에 현장에서 구조물 건전성 감시 시스템의 실시를 통해 AE 신호 획득에서 낮은 샘플링 속도를 활용을 평가했다. 위치 파악 모델과 관련된 모방된 AE 발생원의 위치를 파악하기위해 AE 신호에서 추출한 특징사용이 제약된 기하학적 점 위치파악 가술에 근거하여 개발되었고 정확한 발생원의 위치를 파악하였다. <그림 2-4>는 음향 무선 장치의 제안된 형태이다.



<그림 2-4> 음향 무선 장치 및 2D 모델의 제안된 구성: x와 y는 AE 발생원의 알려지지 않은 좌표, t는 AE 센서 S_1에서의 AE 신호의 도착 시간, d는 S3와 AE 발생원과의 거리, $l_{1,3}$와 $l_{1,2}$는 각각 S_1과 S_3 및 S_1과 S_2 사이의 근사 거리임[5]

2-3-2. 음향 방출 사건 검출법

AE 검출법의 손상 평가 능력을 개선하기 위해 구현할 수 있는 다른 방법의 예는 가동 중 구조 신경시스템(SNS: in-service Structural Neural System)이다. 제안된 수동 SNS는 손상 민감도가 높고 간단한 감시 시스템 기기와 배선을 가지고 있다. SNS를 위한 연속 센서들이 <그림 2-5>처럼 직렬로 연결된 개별 압전(PZT: Pizoelecric)센서에 의해 형성된다. 각 작은 4각형은 <그림 2-5>의 오른쪽의 확대 그림처럼 두 인접한 센서 마디를 나타낸다. 횡 방향의 연속적인 센서는 아날로그 처리기에 연결되고 종 방향의 연속적인 센서는 다른 아날로그 처리기에 연결된다. 아날로그 처리기는 데이터를 단순화하고 컴퓨터에 각각 두 출력 만 보내 처리할 데이터 수와 컴퓨터 전력을 크게 감소시킨다.



<그림 2-5> SNS의 구조: (a) 각각의 작은 4각형은 두 개의 인접한 센서 마디를 나타낸다. 이 예에서 10개의 연속적인 횡 방향 센서와 10개의 연속적인 종 방향 센서가 있다. (b) 오른 쪽의 확대된 그림은 연속적인 횡 방향 센서와 연속적인 종 방향 센서를 형성하는 센서 배치의 상세임[6]

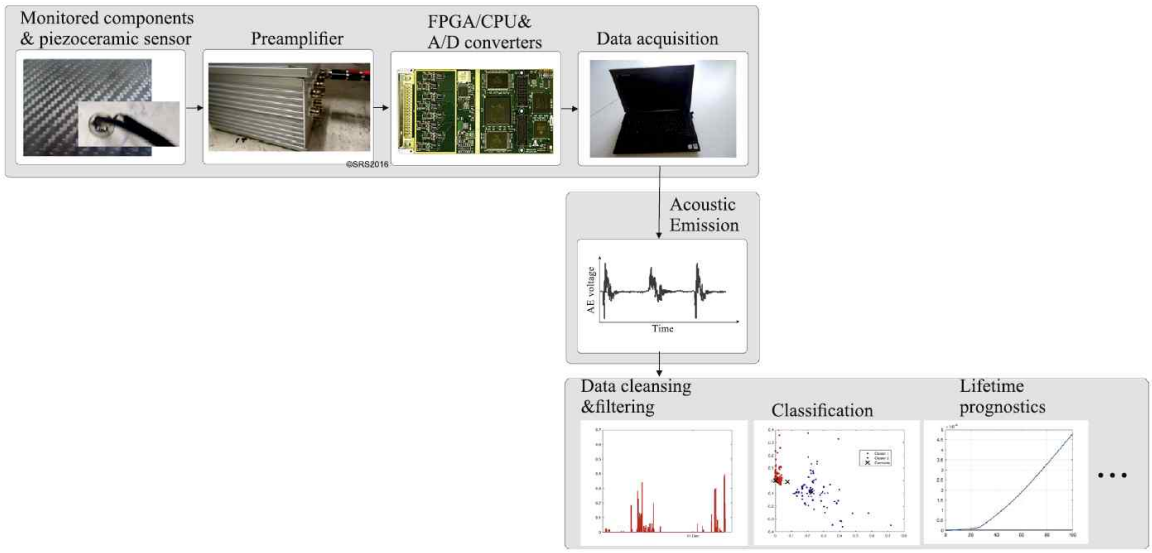
2-3-3. 음향 방출 측정

재료내의 저 진폭 범위와 고주파 대역폭(100kHz~1MHz)의 탄성파 방출이 음향 방출로 알려져 있다. 음향 방출 파는 에너지 방출의 결과로서 변형된 물질 내에서 발생된다. 그러므로 AE 기술은 추가적인 여자 원(excitation source)에 의해서가 아닌 검사되는 목적물에 의해 방출된 탄성파원에 의한 수동적(passive) 비파괴 기술이다. 더구나 시스템 부하 중에 적용되는 드문 비파괴 기술의 하나이다.

AE 탄성파는 SHM에서 신호로 감시된다. 탄성파의 대표적인 소스는 균열 개시, 섬유 파손, 매트릭스 균열, 분리 및 박리처럼 블레이드의 미세 조직의 변화이다. 탄성파는 표면에 탑재된 압전 센서를 사용하여 전기적 신호로 변환된다. 고주파 대역폭(bandwidth)과 함께 낮은 진폭 범위가 음향 파의 포착을 악화시키고 측정 체인과 센서에 추가 필요 사항을 설정한다. 저 진폭 신호는 신호의 진폭이 100~1000배에 도달하도록 증폭되어야 한다. 신호 증폭을 따라 신호대 소음비가 이용할 수 있는 신호뿐 아니라 존재하는 소음도 증폭된다. 소음을 제거하기 위하여 주파수 대역폭이 수 kHz에서 1MHz 사이 범위로 제한되는 반면, 대역 통과 필터가 앞에 말한 대역폭 너머의 주파수를 잘라내기 위해 사용된다.

데이터 획득은 고주파 대역폭에서 작업할 수 있는 A/D 변환기와 빠른 I/O 처리량(FPGA, CPU 어레이 등)을 처리 할 수 있는 요소로 구성된 개발 보드를 해결해야한다. 전형적인 AE 측정 체인이 <그림 2-6>에 묘사되어있다.

사상 수(event count), 상승 시간(rise time), 최대 진폭, 도착 시간, 기간, 신호 에너지 함량 및 제곱 평균 제곱근이 AE 신호 분석에 사용된다. AE 방출 신호 분석의 최근 진전은 여러 실패 메커니즘 사이의 구별이 가능한 것을 보여준다.



<그림 2-6> AE 신호 포착을 위한 측정 체인/데이터 획득 모듈[7]

3. 풍력터빈 부품의 감시 기술

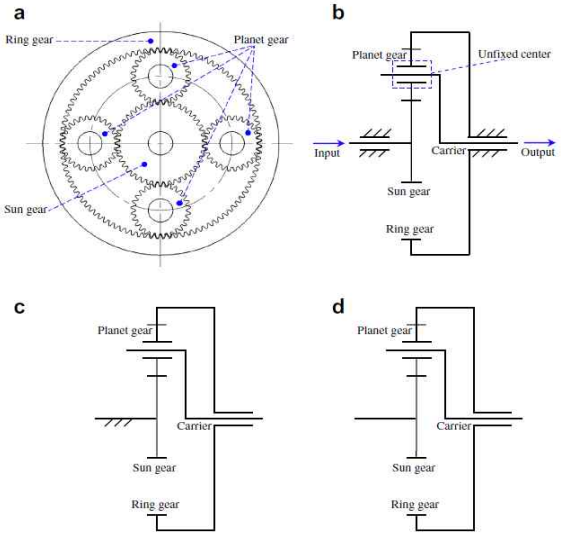
3-1. 유성 기어박스(planetary gearbox)의 상태 감시와 결함 진단

3-1-1. 모델링 법

유성기어 장치는 고정되지 않은 중심을 중심으로 회전하는 여러 개의 행성이 있다. <그 림 3-1>과 같이 기본 유성기어 세트는 링 기어, 자체 중심을 중심으로 회전하는 태양기어 및 고정되지 않은 중심을 중심으로 회전 할뿐만 아니라 태양기어의 중심을 중심으로 회전하는 4 개의 유성기어를 포함한다.

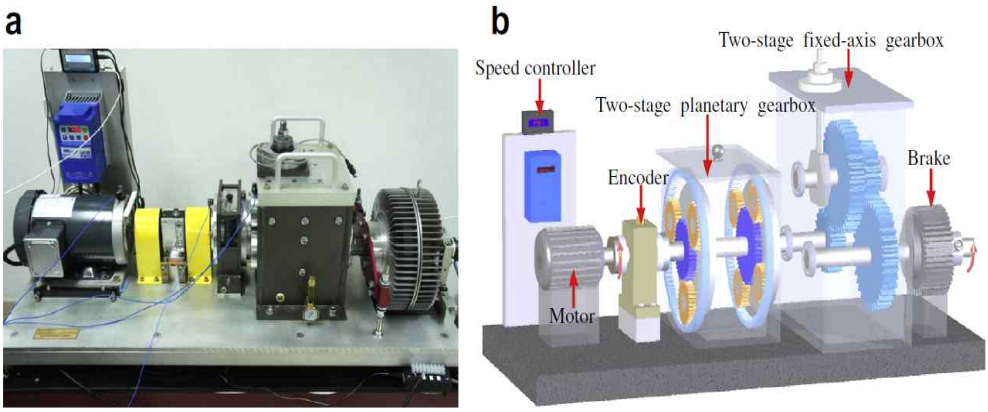
결함의 모사(simulation of defect)를 사용하여 유성기어의 점 부식(pitting), 균열 및 마모와 같은 결함 유형이 모사되었다. 유성기어박스의 태양 기어 위의 치형(teeth) 점 부식과 균열을 모사하였고, 거어 메시 강성에 대한 결함의 영향이 분석되었다. 또한 모델링을 통해 건전한 유성기어와 편심과 외형 오류가 있는 유성기어의 동적 반응을 비교하였다. 이 모델은 유성기어박스의 상태 감시와 결함 진단에 상당한 공헌을 하였으나 모델이 많은 가정과 단순화에 근거하여 개발되었기 때문에 유성 기어박스의 결함 모사 정확성은 높지 않다.

유성기어박스의 진동 반응은 고정 축 기어박스의 것 보다 더 복잡하다. 유성 베어링에 결함이 있는 상태에서 진동 반응을 모사하기 위한 유성기어박스의 분석 모델이 제시되었다. 모델에 근거해서 유성 베어링의 결함 신호가 결정되었다. 생산 오류를 갖는 유성기어 간의 부하 분담을 예측하기 위한 유성기어박스의 단순화된 모델이 확립되었다. <그림 3-2>는 유성기어박스 시험 장치와 개요 모델을 보여 준다.



<그림 3-1> (a) 4개의 유성기어를 갖는 기본 유성기어 세트, (b) 정지 상태의 링 기어를 갖는 유성기어 세트의 계획, (c) 정지 태양기어를 갖는 유성기어 세트 계획 및 (d) 회전하는 태양기어와 회전하는 링 기어를 갖는 유성기어 박스 계획[8]

ReSEAT



<그림 3-2> (a)유성기어박스 시험 장치 및 (b)개요 모델[8]

3-1-2. 신호 처리법

시간-주파수-영역 방법이 시간-영역과 주파수-영역 방법보다 일반적으로 훨씬 효과적이다. 유성기어박스에서 두 가지 흔히 자주 마주치는 결함 형태인 치형 점 부식, 균열을 모사한 신호를 분석하기 위해 위그너-빌(Wigner-Ville) 분포를 사용했다.

3-1-3. 지능적 진단법

신호 처리법이 유성기어박스 감시와 진단에 성공을 보여 주었지만, 결과 신호로부터 결함 폭로는 높은 수준의 전문성이 필요하다. 다양한 지능적 방법이 유성기어박스의 결함 진단에 소개되었다. 유성기어박스의 세 가지 건전성 조건 즉 건전한, 마모된 치형을 갖는 링 기어 및 마모된 치형을 갖는 유성 기어로 분류하기 위한 지능적 방법에 근거한 지원 벡터 기계가 제안되었다.

4. SCADA 데이터 분석 접근법에 의한 풍력터빈 상태 감시

풍력터빈 상태 감시(CM: Condition Monitoring) 시스템 개발과 전용 CM 기술발명에 많은 노력이 투입됐다. 그러나 비용 상승과 여러 성능 제한이 그들의 광범위한 사용을 지연시켰다. 비용 효율적이고 신뢰성 있는 풍력터빈 CM 기술은 오늘날에도 계속 개발되고 있다. 이미 데이터는 수집되었지만 적절한 데이터 해석 도구가 없어 오래 동안 무시 되었던 풍력터빈에서 수집 된 감시제어 및 데이터 획득(SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition) 시스템 데이터의 해석을 통한 기술개발이 제안되었다.

4-1. SCADA 기반 CM 전략

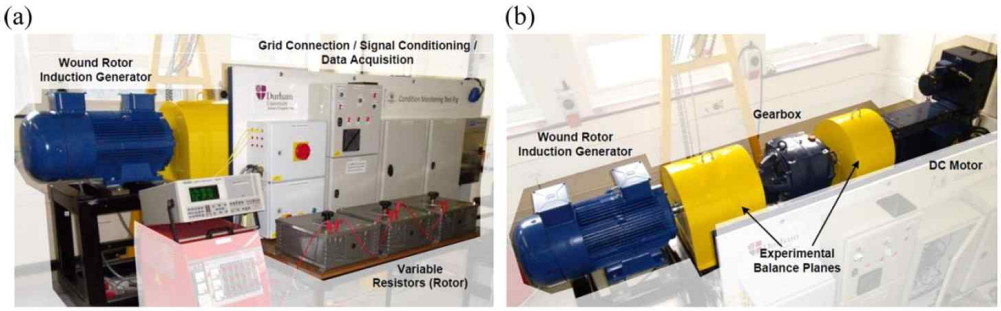
상용 풍력터빈의 CM 시스템은 예측한 데로 수행되지 않고 때로는 허위 정보를 발송해서 초기 결함을 검출하는데 만족스러운 성능을 증명하지 못했다. 의도적으로 설계된 CM 시스템에 비해 풍력터빈 SCADA 시스템은 풍력터빈의 핵심 하위 부품의 정보를 광범위하게 수집한다. 풍력터빈 SCADA 시스템의 추가적 가치가 CM의 분야로 확장될 수 있다. SCADA 시스템은 대부분의 MW 규모의 풍력터빈에 설치되어 있다. 전통적으로 기계는 수학적 모델의 도움으로 감시될 수 있으나 풍력터빈의 CM에 적용할 때는 이 접근법이 어렵다. 예를 들면 풍력터빈의 작동은 복잡한 제어를 포함하기 때문에 풍력터빈을 위한 정확한 수학적 모델을 확립하는 것은 쉽지 않고, 기어 구동 풍력터빈을 위한 모델은 직접 구동 풍력터빈에 적용될 수 없다.

순간적인 반응에 관심을 가지는 대신 새로운 기술은 작동 조건(즉, 풍속)에 걸친 풍력터빈의 일반적인 성능의 검토에 근거한다. 가변속도 피치 조정 풍력터빈에서는 토크와 회전속도는 효율적이고 안전한 발전을 보장하기 위해 정확히 제어돼야 한다. 따라서 풍력터빈 SCADA 데이터는 일단 작동 조건이 알려지면 예측할 수 있다. 예측된 값에서 측정된 값의 이탈은 결함을 나타낸다. 그러나 SCADA 데이터는 풍력터빈 작동 조건에 의존한다. 어떻게 모든 작동 조건 하에서 일탈을 제대로 평가하느냐가 문제로 남는다.

한 가지 해법은 일탈을 해당 작동 조건과 관련시키고 그들에 대한 일반적인 검토를 하는 것이다. 상태 감시 결과의 신뢰성을 보증하기 위하여 상태 감시를 위해 사용된 SCADA 데이터는 주의 깊게 선택되어야 한다. 현재와 과거 데이터에서 유도된 모델의 도움으로 건전성 상태 여부를 CM 기준에 따라 평가할 수 있다.

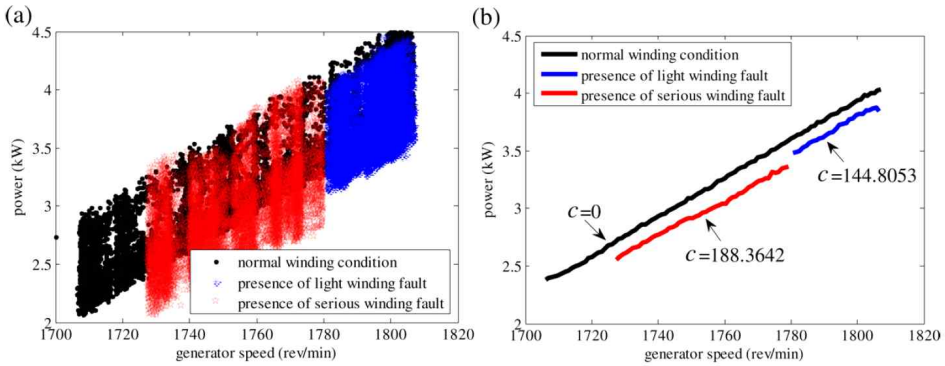
4-2. 풍력터빈 상태 감시 시험 장비

제안된 기술을 시험하기 위해 두 가지 시험이 특별히 설계된 풍력터빈 CM 테스트 장비(<그림 4-1>)에서 수행되었다. 하나는 발전기의 로터에 발생하는 권선 결함을 검출하는 것이고 다른 하나는 시험 장치의 기어박스에서 발생하는 기어 치형(teeth) 결함을 탐색하는 것이다.



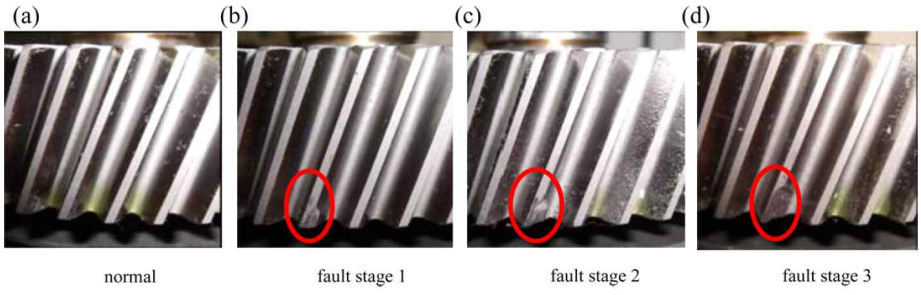
<그림 4-1> 풍력터빈 상태 감시 시험 장비 (a) 정면도 (b) 평면도[9]

시험 장치에서 30kW 4극 3상 권선로터 유도발전기가 5:1 감속비로 2단 기어박스를 거쳐 54kW DC 모터를 통하여 구동된다. DC 모터의 회전 속도는 다양한 속도와 난류에서 자연 바람의 성질을 결합시킨 외부 모델에 의하여 제어된다. 발전기의 로터 회로는 외부 3상 저항 부하뱅크에 집전 고리를 거쳐 연결되어 전기적 불균형이 발전기 로터에 적용될 수 있다. CM 신호가 데이터획득시스템의 도움으로 발전기 단말에서 수집된다. 처음 실험에서 4.7%와 9.2%의 두 수준의 전기적 불균형이 부하뱅크의 상 저항(phase resistance) 조정을 통해 발전기 로터에 적용되었다. 발전기 전력과 회전 속도가 각각 정상과 두 가지의 고장 시나리오에 수집되었다(<그림 4-2(a)>). 제안된 알고리즘이 수집된 데이터를 분석하기 위해 적용되었고 결과는 <그림 4-2(b)>과 같다. <그림 4-2(a)>에서 비록 전력이 발전기 속도의 증가와 함께 증가하는 경향을 보이지만 그 값은 발전기의 건전성상태와 상관없이 넓은 범위에서 변한다. 이것이 CM의 어려움을 증가시키고 특히 초기 결함을 탐지하지 못하게 한다. 그러나 제안된 CM 기술은 문제를 쉽게 해결한다. <그림 4-2(b)>에서 발전기의 효율 결함으로 인해 감소되는 것으로 나타난다. 더구나 결함이 심각할수록 효율은 더 감소된다(즉, 곡선이 정상 위치에서 더 어긋난다). 기준 값 c는 해당 징후를 올바르게 묘사한다.



<그림 4-2> 발전기 권선결함의 탐지결과 (a) 미 가공 데이터, (b) CM 결과[9]

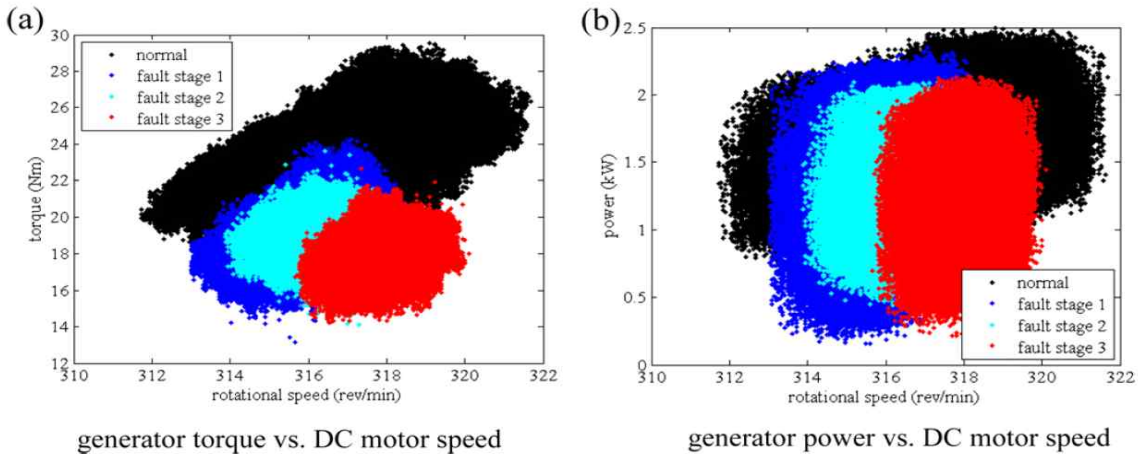
두 번째 실험에서 다른 심각한 수준의 기어박스 결함이 고속 피니언의 주요 접촉 가장자리에 점진적 손상을 소개하여 시험 장치의 기어박스에 모방되었다(<그림 4-3>). 이빨(teeth) 손상의 치수는 1 단계 결함에서 3mm x 2mm, 2 단계에서 5mm x 5mm 및 3 단계에서 7mm x 5mm이다.



<그림 4-3> 실험에서 모방된 기어 이빨 결함 (a) 정상,

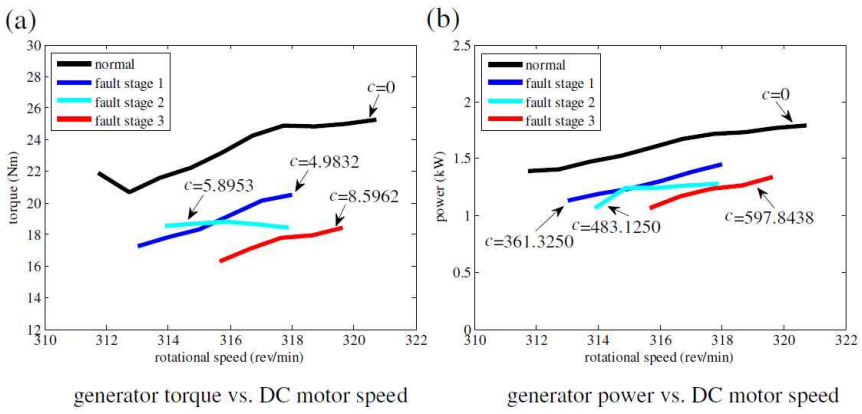
(b) 결함 1단계, (c) 결함 2단계. (d) 결함 3단계[9]

실험에서 DC 모터의 회전 속도, 기어박스 진동, 발전기 토크 및 발전기 전력이 수집되었고 이 결함을 적절히 감지하기 위하여 전동기 토크 대 DC 모터와 전동기 출력 대 DC 모터 속도가 검사되었다(<그림 4-4>). <그림4-4>는 (1) 축 토크와 발전기 출력이 일반적으로 모터의 회전 속도의 증가와 함께 증가한다. (2) 다른 결함 시나리오에서 수집된 데이터는 시스템의 효율이 고장의 계속적인 악화와 함께 시스템의 효율은 점차 감소한다. 결함의 심각성을 평가하기 위하여 데이터가 제안된 CM 기술을 사용하여 분석되었다. 그 결과가 <그림 4-5>에 보인다. <그림 4-5>에서 결함의 연속적인 악화가 모델 곡선의 위치에 의하여 명확히 반영되었다.



<그림 4-4> 기어 결함 탐색을 위한 데이터의 상관관계

(a) 발전기 토크 대 DC 모터 속도, (b) 발전기 전력 대 DC 모터 속도[9]



<그림 4-5> 기어박스 탐색의 결과. (a) 발전기 토크 대 DC 모터 속도.
(b) 발전기 출력 대 DC 모터 속도[9]

SCADA 데이터의 값은 터빈의 건전성 상태에만 의존하지 않는다. 결론을 속단하거나 오류 경보를 촉발하기보다 상세한 추가 조사를 수행하는 것이 좋다. 제어 효과와 다양한 작동조건의 영향을 고려하여 신뢰성 있는 풍력터빈 상태 감시는 순간적 반응에 근거하기보다 작동기간에 걸친 풍력터빈의 일반적 거동의 검토에 근거해야 한다.

5. 결론

풍력에너지를 위한 수요가 기하급수로 증가하면서 정비 비용 감소와 신뢰성 향상이 풍력 터빈 정비 전략에 최우선 순위가 되었다.

로터 블레이드에 변형률 센서를 사용한 부하 감시는 로터 블레이드의 수명추정을 할 수 있다. 전자기 간섭에 대한 중립성 때문에 광섬유 변형률 센서는 풍력터빈 구조물 감시에 유리하게 적용된다. FBG는 측정된 파장과 변형률 사이에 직접적인 물리적 상관관계의 장점을 가지고 있고 파장 부호로 처리된 센서 신호는 전송선에 영향을 받지 않고 확장된 센서망의 다중처리화가 매우 적은 광섬유 회선을 따라 공간부하 분포결과를 제공한다.

실용적인 블레이드의 전 면적 변형과 변형률을 측정할 수 있는 광학기반 감지 시스템이 풍력터빈 블레이드의 표면에 걸친 3차원 디지털 이미지 연관기법과 3D 점 추적 접근법이 평가되었고 동적 공간 데이터를 이용한 다중 카메라 측정 시스템이 제안되었다. 매우 큰 면적에 걸쳐 분산된 전 영역 측정과 시간 소모적인 배선과 고가의 센서를 배제할 수 있다.

무선센서네트워크 및 음향 방출기술의 결합을 기반으로 AE는 풍력터빈 작동 중에 풍하중 아래에서 대부분 블레이드의 결함이 음향파로 원격제어 탐지가 가능하다.

의도적으로 설계된 상태감시 시스템에 비해 풍력터빈 감시제어 및 데이터 획득 시스템(SCADA)은 풍력터빈의 핵심 하위 부품의 정보를 광범위하게 수집한다. 그래서 풍력터빈 SCADA 시스템의 추가적 가치가 상태 감시의 분야로 확장될 수 있다.

<참고문헌>

1. Pierre Tchakoua, Renée Wamkeue, Mohand Ouhrouche, Fouad Slaoui-Hasnaoui, Tommy Andy Tameghe and Gabriel Ekemb, “Wind Turbine Condition Monitoring: State-of-the-Art Review, New Trends, and Future Challenges”, Energies, 7, 2014, pp.2595~2630
2. Kerstin Schroeder, Wolfgang Ecke, Jorg Apitz, Elfrun Lembke and Gerhard Lenschow, "A fibre Bragg grating sensor system monitors operational load in a wind turbine rotor blade", M*easurement Science and Ttechnology,* 17, 2006, pp.1167~1172
3. Vivien Schukar, Nadine Kusche, Gerhard Kalinka and Wolfgang Habel, "Field Deployable Fiber Bragg Grating Strain Patch for Long-Term Stable Health Monitoring Applications", A*pplied Sciences,* 3, 2013, pp.39-54
4. Muammer Ozbek, Daniel J. Rixen, Oliver Erne, Gunter Sanow, "Feasibility of monitoring large wind turbines using photogrammetry", *Energy,* 35, 2010, pp.4802~4811
5. Omar Mabrok Bouzid, Gui Yun Tian, Kanapathippillai Cumanan, and DavidMoore, "Structural Health Monitoring of Wind Turbine Blades: Acoustic Source Localization Using Wireless Sensor Networks", *Journal of Sensors,* 2015, pp.1~11
6. Chia Chen Ciang, Jung-Ryul Lee and Hyung-Joon Bang. "Structural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods", M*easurement Science and Technology,* 19, 2008, pp.2~20
7. Nejra Beganovic, Dirk Söoffker, "Structural health management utilization for lifetime prognosis and advanced control strategy deployment of wind turbines: An overview and outlook concerning actual methods, tools, and obtained results", *Renewable and*

Sustainable Energy Reviews, 64, 2016, pp.68~83
8. Yaguo Lei, Jing Lin, Ming J. Zuo, Zhengjia He, "Condition monitoring and fault diagnosis of planetary gearboxes: A review", *Measurement*, 48, 2014, pp.292~305
9. Wenxian Yang, Richard Court, Jiesheng Jiang, "Wind turbine condition monitoring by the approach of SCADA data analysis", *Renewable Energy*, 53, 2013, pp.365~376

<관련기술목록>

1. Magdalena Mieloszyk, Wiesław Ostachowicz, "An application of Structural Health Monitoring system based on FBG sensors to offshore wind turbine support structure model", *Marine Structures*, 51, 2017, pp.65~86
2. Peyman Poozesh, Javad Baqersad, Christopher Niezrecki, Peter Avitabile, Eric Harvey, Rahul Yarala, "Large-area photogrammetry based testing of wind turbine blades", *Mechanical Systems and Signal Processing,* 86, 2017, pp.98~115
3. Jialin Tang, Slim Soua, Cristinel Mares, Tat-Hean Gan. "An experimental study of acoustic emission methodology for in service condition monitoring of wind turbine blades", *Renewable Energy*, 99, 2016. pp.170~179
4. Henrique Dias Machado de Azevedo, Alex Maurício Araúo, Nadège Bouchonneau "A review of wind turbine bearing condition monitoring: State of the art and challenges", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 2016, pp.368~379
5. Xiang Li, Zhibo Yang and Xuefeng Chen, "Quantitative Damage Detection and Sparse Sensor Array Optimization of Carbon Fiber Reinforced Resin Composite Laminates for Wind Turbine Blade Structural Health Monitoring". *Sensors,* 14, 2014, pp.7312~7331
6. Ruizhen Yang, Yunze He, "Optically and non-optically excited thermography for composites: A review", *Infrared Physics & Technology,* 75, 2016, pp. 26~50
7. Ruizhen Yang, Yunze He, Hong Zhang, "Progress and trends in nondestructive testing and evaluation for wind turbine composite blade", *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 60, 2016. pp.1225~1250
8. P.J. Schubel, R.J. Crossley, E.K.G. Boateng, J.R. Hutchinson, "Review of structural health and cure monitoring techniques for large wind turbine blades", *Renewable Energy,* 51, 2013. pp.113~123
9. Lars Boger, Malte H.G. Wichmann, Leif Ole Meyer, Karl Schulte,"Load and health monitoring in glass fibre reinforced composites with an electrically conductive nanocomposite epoxy matrix",*Composites Science and Technology*, 68, 2008 pp.1886~1894

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.