

## 풍력 터빈 상태 감시 시스템 현황

### The Present State of Wind Turbine Condition Monitoring System

Timothy J. Clark† · Richard F. Bauer\* · James R. Rasmussen\* · 정재홍\*\* · 이병준\*\* · 이창묵\*\*

Timothy J. Clark, Richard F. Bauer, James R. Rasmussen, JH Jeong, BJ Lee and CM Lee

**Key Words : Wind Turbine, Acceleration Enveloping, On-line Monitoring System, Continuous Monitoring System**

#### ABSTRACT

The \$9 billion US global wind energy market is experiencing dramatic growth with installed generating capacity up 500% from 7,600 MW at the end of 1997 to nearly 39,300 MW at the end of 2003. With an average annual increase approaching 32%, wind is the world's fastest growing energy source on a percentage basis, and its growth is forecast to continue a double-digit pace into the next decade. While much of this growth is fueled by government decisions that are favorable to "green" or renewable power, it is also fueled by advances in wind turbine technology as evidenced by larger, more sophisticated machines. As a result, wind turbines are becoming more established as an economically viable alternative to fossil-fueled power generation. Today, wind "farms" - consisting of anywhere from a single turbine to as many as several hundred turbines - are an important component of the world's source of electric energy.

#### 1. The Wind Turbine

풍력터빈은 바람을 에너지로 변환시키는 복잡한 기계다. 많은 에너지를 얻어내기 위해서는 큰 직경의 터빈이 필요하고, 터빈 회전속도가 느리기 때문에 발전기 회전속도까지 증속되어야 한다.

가장 현대적인 풍력터빈은 통상 10에서 20 rpm 사이의 저속에서 운전되고, 60m 이상의 직경을 갖는 three-blade 터빈으로 구성되며, 조절 가능한 blade 피치를 가지고, 다양한 바람상태를 수용하기 위해 blade의 "feather" 에 제어시스템을 둔다.

축의 회전속도는 4 혹은 6극 발전기를 구동하기 위해 gearbox를 통해서 대략 1000 ~ 2000 RPM으로 증속된다.

모든 풍력터빈은 저속에서 운전되기 때문에 gearbox의 구성요소들은 구름요소 베어링에 의해 지지된다. 구동열은 터빈 제어시스템과 함께 타워 꼭대기 nacelle의 안쪽에 장착되어진다. 이 타워는 nacelle내부로 통하는 접근사다리가 있어 속이 비어있는 구조이다.

풍력터빈은 풍속, 풍향 등을 측정하기위해 nacelle의 꼭대기에 대기센서가 달려 있고, 이들은 제어시스템에 연결된다. 풍향 감지를 통해, 제어시스템은 터빈이 바람방향을 향하도록 타워 꼭대기의 nacelle을 회전시키는 yaw 모터를 이용한다. 통상, farm에 있는 모든 풍력터빈들은 개별 LAN을 가지며, LAN을 통해 SCADA, 제어시스템, 별도 계장시스템, 그리고 로컬 혹은 원격 운전센터에 연결된다.

#### 2. Vibration Instrumentation

일반적으로, 풍력터빈은 하나 이상의 가속도계 혹은 속도계와 최소한 하나 이상의 1회전 당 1번

† GE Energy

E-mail : timothy.clark@ps.ge.com

\* GE Energy

\*\* GE Energy Korea

의 신호를 내보내는 Keyphasor 센서에 의해 감시된다. 직접적인 진동이 통상 감시대상이고, 주파수 분석이 수반된다. 풍력터빈에서 주요한 진동 주파수는 gear-mesh 주파수와 베어링 결함 주파수이다.

gear-mesh 주파수는 sun gear, planets, ring gear의 조합, 두 개의 다른 피니언, 그리고 gear 자체에서 발생하는 세 개의 주파수가 기본 주파수이다. 그리고 4개의 결함주파수(내륜 볼 통과, 외륜 볼 통과, 케이지, 요소자전) 집합을 양산하는 많은 베어링으로 지지된 축이 있다.

mesh 주파수, 조화성분 그리고 베어링 결함 주파수의 조합이 만들어 내는 주파수의 분석은 쉽지 않은 작업이다.

### 3. The Business Case

지난 몇 년 전까지, 풍력터빈의 용량은 대부분 1MW 이하였고, 이러한 설비에 대해 연속 상태 감시 시스템(Continuous Condition Monitoring System)을 적용하는 것은 경제성이 떨어졌었다.

연속 상태 감시 시스템의 적용 조건은 하루당 몇 백만 달러 이상의 손실을 주는 중요기계의 정지시간을 감소시키는 것이었지, 풍력터빈을 위한 것은 아니었다.

풍력터빈의 용량이 점차 커지고 있다하더라도 (2003년 풍력터빈의 평균출력은 약 1.5MW부터 3+MW이 일반적이었고, 5+MW 이상은 베타 테스트 중임), 온라인 상태 감시 시스템을 적용하기에는 지나치게 높은 유지보수비용이 소요된다. 주로, gearbox 및 베어링 문제와 연관된 구동열 유지보수는 풍력터빈의 주요한 운전정지 원인이다. 대부분의 경우, gearbox와 베어링은 운전시간에 비례적으로 수명이 감소된다. 이렇게 점진적으로 수명이 감소되는 동안, gearbox와 베어링 같은 구성요소들은 무엇을 확인해야 되는지 아는 사용자라면 충분히 확인할 수 있는 특징적인 결함 진동 신호를 제공한다.

결함 감지 능력은 매우 중요하다. 왜냐하면 일정 시간 내에 결함을 찾아내지 못하면, 구동열의 다른 부분과 발전기에 심각한 문제를 일으킬 수 있기 때문이다. 이것은 베어링 혹은 gear의 수명

이 다해서 단순 교체하는 것 보다 수리비용이 더 크기 때문이다.

1,500달러짜리 베어링의 결함이 간과되었을 때, 그것은 100,000달러짜리 gearbox의 교체, 50,000달러짜리 발전기의 권선을 다시 감게 하고, 70,000달러짜리 크레인을 동원하여야 고장난 요소에 접근하게 한다. 기계의 상태를 감시하는 방법이 없다면, 이러한 사태가 발생할 수 있다. 이를 잘 알고 있는 유럽의 보험업자들은 터빈에 공인받은 감시시스템이 장착되어 있지 않으면, 매 40,000 운전시간 마다 터빈 분해검사를 요구하고 있다.

따라서 감시시스템은 유지보수 비용의 경감뿐만 아니라, 요구받은 운전정지 기간까지도 경감시키는 좋은 효과를 제공한다.

### 4. Acceleration Enveloping

엔벨로핑은 중요설비의 수명과 상태에 관한 많은 정보를 줄 수 있는 도구이다. 주요한 용도는 베어링과 gear 같은 구름요소 결함의 조기감지를 위해 사용된다. 엔벨로핑된 가속도는 기계 상태의 변화를 평가할 수 있는 경향(trend)에서 특별히 가치 있는 파라미터다. 엔벨로핑은 다른 기계 진동계측기법에 비해 결함진행 초기에 진단이 가능하다. 엔벨로핑과 같은 조기 결함 검출 기법 없이는, 엔지니어는 전체 진동치가 상승하고, 유효활유가 오염되고, 온도가 상승 하는 말기결함까지 기다릴 수밖에 없다.

엔벨로핑 기술은 전체적인 기계진동신호로부터 반복적인 진동값을 추출하여, 저수준의 분석과 검출을 할 수 있다. 엔벨로핑은 금속마찰이 있는 기계에서 결함의 조기 예측을 가능하게 한다.

Fig 1에서 나타내듯이 엔벨로핑은 전체 진동값으로부터 관심 있는 영역의 신호를 추출하기 위한 다단계 처리작업이다. 구름요소 베어링에서, 베어링 요소와 결함사이의 상호작용은 베어링 지지구조물의 구조 공진주파수를 가진다. 엔벨로핑 처리절차는 다음과 같다.

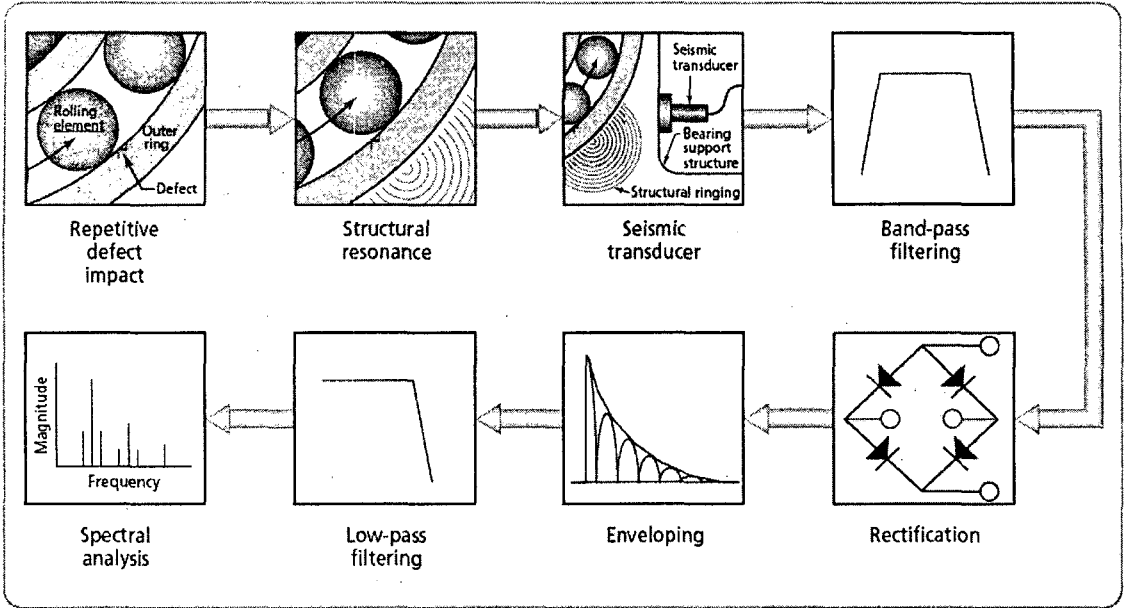


Fig 1. Typical steps in the implementation of enveloping

1. 센서로부터 취득된 신호는 공진 주파수 주변의 요소만을 유지하기 위해 band pass 필터를 통과한다.
2. 필터를 통과한 신호는 정류되고 그때 구조공진주파수 제거와 결함 충격주파수를 유지하는 엔벨로핑 처리가 된다.
3. low-pass 필터를 통해 관계없는 고주파 요소가 제거하고, 스펙트럼을 생성한다.
4. 주파수 요소는 물리적인 베어링 파라미터와 연관되고, 스펙트럼의 경향은 결함의 진전 상황을 보여준다.

엔벨로핑은 충격력이 만들어 내는 결함에 높은 감도를 가지고, 분석의 복잡함을 감소시킬 수 있다. 구름요소베어링 결함은 충격력 범주에 속한다. 내외륜 혹은 볼에서의 결함부위는 구조의 고유진동수를 가진시키는 반복적인 충격력의 원인이 된다. 이러한 고유진동수를 증폭시키는 진동은 충격력에 의해 야기되고, 쉽게 관측될 수 있다.

고주파 구조진동의 존재에 의존적인 엔벨로핑 때문에 가속도계가 진동 관측에 일반적으로 사용되므로 통상 “가속 엔벨로핑” 이라 한다.

### 5. Case History

Fig 2는 손상된 베어링이 있는 기계에서 취득된 출력 축 가속도 데이터에서 가공되지 않은 가속도 신호 스펙트럼(blue)과 엔벨로프 처리된 스펙트럼(red)을 보여준다.

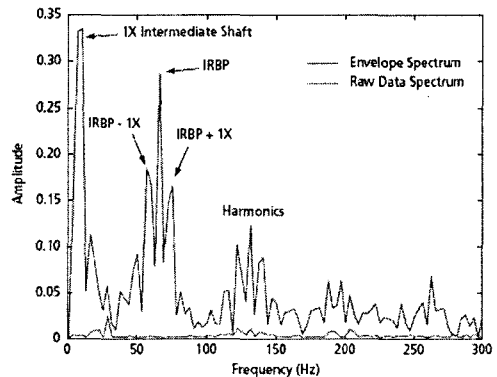


Fig 2. High sensitivity of enveloping to bearing defect frequency

데이터는 베어링 결함 주파수에서 엔벨로핑의 높은 감도를 보여준다. 엔벨로프 스펙트럼에서, 8 Hz 근방의 가장 낮고 돌출된 주파수는 gearbox 중간축의 회전속도에 상응한다. 다음 특성(66Hz)은 중간축 베어링 중의 하나에서의 내륜 볼 통과(IRBP) 주파수이다. 이것은 66Hz 주파수의 양쪽 8Hz에 위치한 두 개의 측대파(Side-band)를 갖는다. 132Hz 근방의 주파수 군은 66Hz 주변 그룹의 조화성분을 나타낸다. 이들 조화성분은 엔벨로핑 알고리즘에 의해 생긴 것으로 물리적인 의미는 없다. 이 베어링은 교체 후 분리되어 관찰한 결과 실질적인 손상은 내륜에서 발견되었다. Fig 3은 내륜에서 발견된 결함을 나타낸다. 베어링 교체 후, 풍력터빈은 재가동되었다.



Fig 3. Damage on the inner race of one of the intermediate shaft support bearings

Fig 4는 Fig 2에서처럼 같은 가속도계로 부터의 가공되지 않은 가속도 신호 스펙트럼(blue)과 엔벨로프된 스펙트럼(red)을 나타낸다. 가공되지 않은 가속도 데이터의 스펙트럼은 일부 gear-mesh 주파수를 나타내지만, 엔벨로프된 스펙트럼은 완벽하게 깨끗하다.

가공되지 않은 스펙트럼이 gear-mesh 주파수 분석에 유용한데 반해, 엔벨로프 스펙트럼은 풍력터빈 장치에서 베어링 결함 주파수에 대해 높은 감도를 제공한다.

엔벨로핑의 뛰어난 장점은 같은 스펙트럼에서 gear-mesh 주파수에 의한 왜곡 없이 베어링 결함 주파수 관측을 가능하게 한다. 이러한 효과는

Fig 2, 4에 잘 나타났고, gear-mesh 주파수가 가공되지 않은 신호 스펙트럼에서는 나타났지만, 엔벨로핑 스펙트럼에서는 사라졌다. 이것은 gear 맞물림이 비교적 부드럽고, 아주 작은 충격에너지를 양산하기 때문에 나타난다. gear-mesh 주파수는 가공되지 않은 데이터가 첫 번째 high-pass 필터를 통과하는 동안 사라졌다.

엔벨로핑은 풍력터빈에 채택된 베어링 감시를 위한 강력한 도구를 제공한다. 이것은 현재 Trandmaster Pro System(Bently Nevada's Product) 뿐만 아니라 Snapshot(Bently Nevada's Product) 계열의 휴대용 데이터 수집 장치에서 기능이 포함되어 있다.

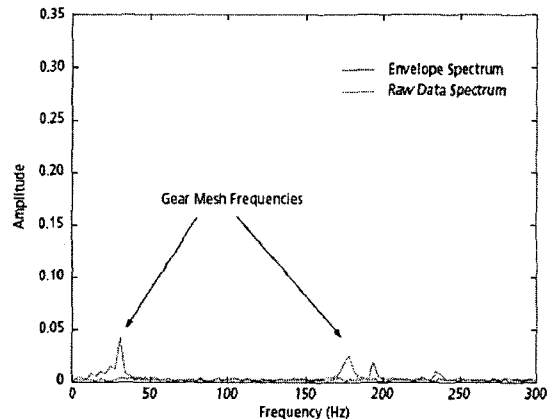


Fig 4. The envelope spectrum from the machine with the new bearing shows no bearing defect frequency

## 6. The Need for Online Monitoring

풍력터빈을 위한 다양한 분석기법 특히 엔벨로핑의 장점을 case history를 통해 언급하였지만, 풍력터빈은 설계할 당시부터 원격지이면서 일반인의 접근이 용이하지 않은 바람이 많은 지역을 고려하게 된다.

대부분의 풍력터빈 관리자들은 휴대용 data 수집 장치를 가지고 주기적인 관리를 해오고 있다.

그러나 이러한 방법은 몇 가지 약점을 가지고 있다. 고장과 수리 시에 휴대용 데이터 수집 방법과는 대조적으로 온라인 시스템은 많은 이점을 사용자들에게 제공한다.

## 6.1 Drawbacks of Portable Data Collection

- 원격지 출장비용이 과도하게 산정되므로 비실용적이다.
- nacelle 내부의 기계가 구동 중에 측정 장비를 모두 가지고 타워에 올라가야 하기 때문에 안전성에 문제가 있다.
- 풍력터빈의 진동데이터는 풍속, 구동RPM, 파워(토크)출력에 따라 매우 가변적이기 때문에, 수동적인 데이터 수집은 동일상태에서 데이터가 수집되었다는 보장을 할 수 없고, 또한 풍속, 구동RPM과 같은 변수를 알 수 없다면 데이터 분석이 힘들어진다.
- 휴대형 트랜스듀서 배치, 방향, 압력, 그리고 다른 요소들의 변화는 신호취득의 심각한 왜곡을 양산할 수 있다.
- 기업안전정책의 승인을 받기 위해서는 풍력터빈 데이터를 취득 시 최소한 2명의 작업자가 필요하다. 또한, 작업자는 격렬한 등반을 필요로 하기 때문에 하루에 4~5대의 풍력터빈 정도만 조사할 수 있다. 전통적인 수동데이터수집 프로그램은 기계별로 수집된 시계열 데이터 당 0.2~0.3의 M/H를 요구한다. 대조적으로, 풍력터빈은 다른 산업설비에 비해 최소 10배 이상 비싼 기계 당 최소 3.2 M/H를 요구한다.

## 6.2 Benefits of Continuous Monitoring

- 데이터 수집을 위한 출장이 없으므로 인건비를 절감한다.
- 데이터 수집 간격이 몇 주, 몇 개월 단위가 아니라 매 분단위이기 때문에 데이터 수집 사이의 결함은 거의 없다.
- 작업환경이 위험하지 않고, 현장출장 및 타워 등반이 필요 없이 원격감사가 가능하다.
- 운전시간이 아니라 관측된 상태를 기반으로 유지보수를 하기 때문에, 보험업자로부터 요구받는 운전정지를 소거할 수 있다.
- 더 광범위한 관측을 제공하기 때문에, 수집된 데이터는 SCADA와 제어시스템으로부터의 운전 변수들과 훨씬 쉽게 연결될 수 있다.

- 일관성 있고 효과적인 기계진단결정의 표준화를 위해, 파워(토크), 축회전속도, 풍속과 같은 기계 상태가 일정하게 유지될 때 데이터를 수집할 수 있다.

Fig.5에서는 데이터 취득 시스템의 개요를 나타낸다. 센서의 신호는 DSM(Dynamic Scanning Module)을 통과해 SCADA에 연결된 System1 서버에 저장된다. System1에 별도로 연결된 제어 시스템 컴퓨터를 통해서서는 풍력터빈의 출력(Power), 토크, gearbox, 발전기, 그리고 대기온도, Blade 각도, 풍속 등의 추가적인 정보 수집을 가능하게 한다.

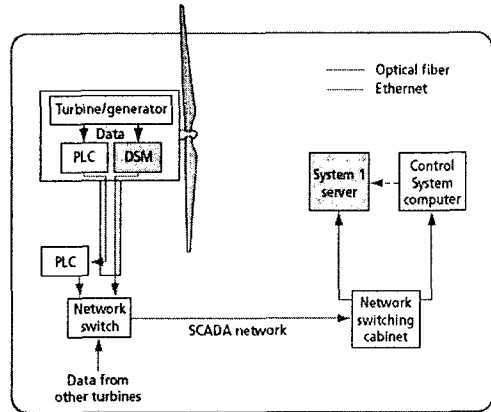


Fig. 5 The data acquisition system

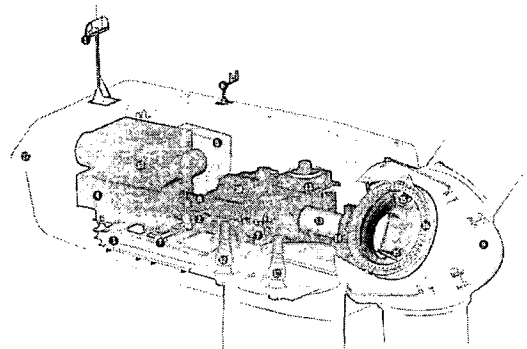


Fig. 6 TYPICAL WIND TURBINE

1. Wind measurement equipment, 2. Hydraulic parking brake
3. Main frame, 4. Generator, 5. Control panel, 6. Aviation light
7. Impact noise insulation, 8. Coupling, 9. Nose cone, 10. Gearbox
11. Oil cooler, 12. Yaw drive, 13. Rotor shaft, 14. Bearing housing
15. Pitch drive, 16. Rotor hub, 17. Ventilation
18. Heat exchanger

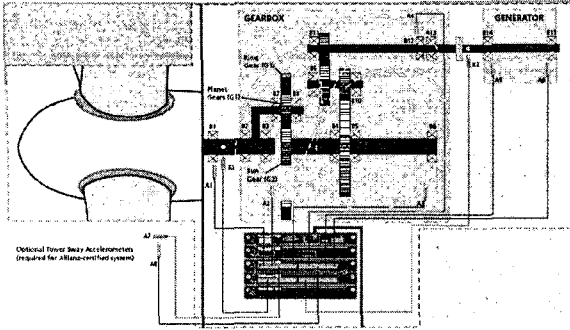


Fig. 7 Nacelle inside structure

Table. 1 Role of each sensors in Fig.7

ID	Sensor	Component(s) Monitored
A1	Main bearing accelerometer	Turbine main bearing (B1)
A2	Planetary gear Stage accelerometer	Planetary gears/bearings (G1, G2, G3, B2, B3, B7, B8, B9)
A3	Intermediate speed stage accelerometer	Intermediate-speed gears/bearings (G4, G5, B4, B5, B6, B10)
A4	High speed stage accelerometer	High-speed gears/bearings (G6, G7, B11, B12, B13)
A5	Generator inboard accelerometer	Generator inboard bearing (B14)
A6	Generator outboard accelerometer	Generator outboard bearing (B15)
A7	Nacelle transverse accelerometer	Tower sway perpendicular to turbine shaft axis
A8	Nacelle axial accelerometer	Tower sway parallel to turbine shaft axis
K1	Keyphasor <sup>®</sup> 1	Turbine speed
K2	Keyphasor <sup>®</sup> 2	Generator speed
V1	-	Power
V2	-	Torque
V3	-	Wind velocity

\*System1 : Bently Nevada's product

## 7. Conclusions

본 논문을 통해 풍력터빈을 구성하는 주요요소에 대해 살펴보고, 풍력터빈에서 진동문제 발생의 원인인 gearbox와 베어링을 감시하기 위한 엔벨로핑 기법을 살펴보았다.

환경오염이 큰 화두로 대두되면서 세계 각국에서는 풍력에 대한 관심이 고조되고 있다. 이와 관련하여 풍력터빈은 점진적으로 대용량화 되어 가고 있으며, 에너지 생산 핵심요소로서의 성장에 예측된다. 그러나 기존의 원자력 및 화력발전 설비에 비해 진동감시시스템의 채택이 전무한 실정이다. 주로 바람이 많은 원격지에 설치되어 있는 풍력터빈을 감시하기 위한 방법이 휴대용 장비를 이용한 신호 취득이라면, 작업자의 안전과 신호의 신뢰성에 의문을 갖지 않을 수 없다. 따라서 온라인 진동감시시스템의 채택이 절실히 요구된다