

# 풍력터빈 베어링 상태 모니터링 최신기술 고찰 및 도전 과제

한국과학기술정보연구원  
전문연구위원 백태현  
(thbaek@reseat.re.kr)

## 1. 머리말

- 풍력에너지는 성장하고 있으며 신뢰성이 있는 신재생 에너지이다. 그러나 산업체에서는 여전히 조기에 주요 부품 결함이 발생되어 운영 및 유지보수(O&M: operation and maintenance) 비용이 증가하고 있다.
- 베어링의 조기 크랙 발생은 기대수명의 5~10% 상태에서 또는 3년 이내 운전 중에 감지되고 있으며, 매년 145대의 터빈 중 1회 기어박스 결함이 발생하는 것으로 추정된다. 기어박스 결함의 50% 이상이 베어링에 기인하기 때문에 풍력터빈 베어링상태 모니터링(WTBCM: wind turbine bearing condition monitoring)은 조기 결함을 방지하기 위한 우선순위에 속한다.
- 조기 결함을 방지하기 위해 풍력터빈 설계 개발 개선이 필요하며, 신뢰성 있고 비용효과가 높은 상태감시(CM: condition monitoring) 기법이 적용되어야 한다. 이러한 요인을 근거로 추정하면, 상태감시 시스템(CMS)은 판매자와 구매자 각각의 관점에 따라 2015년도에 25%에서 36.1%로 증가한 것으로 예상하였다.

## 2. 상태감시 정의 및 베어링의 중요성

- CM은 모니터링 프로세스 또는 다운타임(고장시간) 및 O&M 비용을 최소화하여 결과적으로 생산을 극대화할 목적으로 결함, 실패와 기계마모를 조기 발견하는 데 초점을 맞춘 중요한 도구이다. 또한 CMS는 기계의 건전 상태를 추정하고, 보수 작업에 대해 가장 적합한 결정을 할 수 있도록 기술, 전문 인력, 조건 지표, 그리고 품질 및 데이터 측

정을 통합한 프로세서 도구로 정의할 수 있다.

- 또한 풍력 터빈에 관한 베어링 결함의 영향을 인식하는 것이 중요하다. 여러 CM에 관한 논문은 기어박스과 발전기 연구에 집중하고 있다. 왜냐하면 이들 장비는 풍력터빈 가동 중단에 주요 원인이며 높은 생산 손실을 초래하고, 풍력발전 단지의 수명 기간 중에 높은 교체비율을 차지하고 있기 때문이다.
- 최근 연구에 따르면 베어링은 기어박스 고장의 약 70%, 그리고 발전기 가동 중단에 21-70%(발전량 P를 기준으로 소형 발전기( $P < 1\text{MW}$ )에서는 21%, 중형발전기( $1\text{MW} < P < 2\text{MW}$ )는 70%, 대형발전기( $P > 2\text{MW}$ )는 50%) 비율을 차지하였다. 교정 정비(corrective maintenance)는 오류발생 후에 이루어지므로 고장을 사전에 방지 할 수 없다.
- 예방 정비(preventive maintenance)는 과소(미흡) 및 과다(과잉) 유지보수라는 두 가지 문제점이 있다. 시스템 성능을 잘 관찰하지 않으면 예상하지 않은 고장이 발생되거나 또는 자원의 낭비를 일으키는 과도한 유지보수 활동이 될 수 있다. 그러므로 적합한 예방정비를 위해 베어링 상태를 기반으로 하는 유지 기법을 사용하여 초기 결함을 진단할 수 있는 방법이나 기구를 개발하는 것이 중요하다.

### 3. 데이터 획득 기법

- 음향측정(acoustic measurement)
  - 음향 모니터링에 사용되는 센서는 저감쇠(low attenuation) 특성을 갖는 유연한 접착제(flexible glue)로 측정대상 부재에 부착한다. 음향 센서는 음압 수준과 변화를 내부적 및 외부적으로 전압신호로 변환시킨 다음 계측기에 기록한다. 이 측정법은 앤티 앨리어싱(antialiasing), 높은 샘플링 비율 및 동적 범위(dynamic range)를 모두 구비한 획득 장치를 사용하여 이러한 유형의 측정에 적용한다.
  - 풍력 터빈 소음은 특성에 따라 분절소음이라 말하는 톤(tonal), 광대역(broadband), 저주파, 그리고 충격파의 네 가지 다른 형태가 있다.

소음 측정으로부터, 가능한 고장을 예측하는 높은 주파수 성분이 결정될 수 있다.

- 가장 효과적인 음향 기반의 베어링 건전 상태 모니터링은 음향 방출(AE: Acoustic Emission)법이다. AE 신호는 고체 재료의 변형 에너지의 갑작스런 방출에 기인한 과도 임펄스(transient impulse)에 의해 나타난다. 이 기법의 장점은 표면 또는 표면 내부에 있는 마이크로 결함을 감지할 수 있는 능력과 민감성이고, 비용 효과 비율이 높은 잠재력이 있으며, 비교적 단순하고 신뢰성이 있는 CM기법이다.

#### ○ 전기 효과(electric effect) 모니터링

- 모터, 발전기, 그리고 축전지와 같은 전기 기구의 CM은 일반적으로 비정상적인 현상을 관찰하기 위하여 전압과 전류 분석을 통해 이루어진다. 축전지(accumulator)에서는 임피던스가, 그리고 특정한 풍력 터빈 구성품의 구조를 평가하기 위해 전기저항이 사용될 수 있다. 회전하는 전기 기계의 CM에 광범위하게 사용되지만 경험 부족으로 풍력 터빈에는 아직 이용되지 않고 있다.
- 관련 기법으로 방전 측정(discharge measurement), 속도 측정, 접촉력 측정, 그리고 오일 분석 방법 등이 있다. 이 기술은 중간/고전압 그리드(medium/high voltage grid), 스위치, 변압기, 그리고 케이블 절연 결함을 검출하는데 이용될 수 있다. 이러한 형태의 검사 측정은 풍력 터빈 동작에는 영향을 미치지 않는다.

#### ○ 전력 품질(power quality)

- 풍력 발전은 점점 더 많은 그리드 준수(grid compliance) 기준을 충족해야 하며, 전력 품질은 더 나아지고 신뢰할 수 있어야 한다. 베어링 결함과 같은 몇 가지 결함은 기계적 또는 전기적 에너지에 미치는 영향에 따라 감지될 수 있다.
- 전력 품질은 감시 제어 및 데이터 획득(SCADA: supervisory control and data acquisition) 시스템을 통해 얻을 수 있다. 보수 작업이 필요

하거나 또는 유지 보수(O&M) 개선이 필요한 베어링의 단순 플래그 (simple flag) 또는 문제점을 나타내기 위해 통계적 지표가 사용될 수 있다.

○ 온도 모니터링(TM: temperature monitoring)

- 온도 측정에 사용될 수 있는 센서에는 여러 종류가 있으며, 가장 일반적인 것은 저항온도 감지기(RDT: resistance temperature detector), 광 고온계(optical pyrometer), 그리고 저항 온도계(resistant thermometer)가 있다.
- 베어링이나 기어가 작동 시 불충분하거나 비효율적인 윤활제 특성, 그리고 정렬 불량으로 마찰을 일으키면, 잉여의 열이 발생되고 온도를 상승시키기 때문에 이 방법을 사용하여 결함을 감지해 낼 수 있다. 그러나 온도 모니터링의 단점은 다른 CM에 비해 때때로 너무 늦게 그리고 천천히 나타나는 것이다.

○ 오일 찌꺼기 감시(ODM: oil debris monitoring)

- 풍력 터빈의 베어링이나 기어에 결함이 증가될수록 파편 또는 찌꺼기 (debris)가 점점 더 많이 되어 윤활유를 통해 결국은 오일 필터에 도달한다. 이 방법의 주요 목적은 기름에서 금속 파편 유무를 감지해내는 것이다.
- 기름 상태 모니터링은 대부분 주기적으로 샘플을 채취하여 오프라인으로 행해지고 있다. 그러나 이러한 상황이 변화되어 온라인 오일 모니터링으로 점점 더 일반화되고 있는 추세이다. 이는 복잡한 데이터 분석을 하지 않고도 단지 분말 입자 숫자에 의한 결함의 진행과 심각도(severity)를 직접 측정할 수 있기 때문이다.

○ 진동 해석(VA: vibration analysis)

- 진동 해석은 국부적 또는 분산된 형태의 서로 다른 손상, 마모, 그리고 예상할 수 있는 결함에 의해 발생된 유용한 정보를 탐지하여 추출

해 낼 수 있는 다용도 도구이다.

- 베어링 손상의 초기 단계에서는 높은 주파수 신호를 생성하며 결합 주파수는 잡음 플로어(noise floor)에 가까우므로, 베어링 결합에 관한 진동 스펙트럼은 이 단계에서 효율성이 저하될 수 있다. 그러나 베어링의 결합 주파수, 그리고 결합의 종류와 위치를 분명하게 식별하는 고주파 성분(high frequency content)에 적용되는 고체 인벨로핑(solid enveloping) 및 복조 기법(demodulation method) 등이 있다.
- 진동레벨을 관찰할 수 있는 또 다른 방법은 웨이블릿 변환(wavelet transformation)을 통해서 이루어 질 수 있다. 이 기법은 베어링 결합 및 정렬(조정) 불량에 성공적으로 적용되고 있다. 이 기법은 풍력 터빈에서 생성된 결합을 감지하는 일반적인 지표로 사용될 수 있으며, 다른 시스템 환경에서 시험 및 평가 중인 현대적인 식별 도구이다.

#### 4. 기술적, 경제적, 그리고 운영상 도전 과제

- 풍력터빈 베어링 상태 모니터링(WTBCM)은 CMS 구매에서 풍력 발전 단지 모니터링 단계까지 기술적, 재정적, 운영 및 관리 문제를 포함한다 다섯 가지 주요 도전 과제로 요약할 수 있으며, 이들은 다음과 같다.
- CMS가 직면한 모든 문제는 첫 번째 구매단계에서 발생한다. 왜냐하면 시스템의 자금 회수는 계약 시 정확히 측정할 수 없기 때문이다. CMS를 구입하는 경우, 풍력단지에 수년간 어떠한 결합이 발생하고 투자금을 회수하는 방법에 대해 알 수 없다. 시스템 설치 후, CMS로 인해 교체/검출된 각 고장에 대해 경제적 이익을 추정할 수 있어야 한다.
- CMS 기술 사이의 어려운 통합(hard integration)은 또 다른 도전 과제이다. 예를 들어, 일부 풍력발전 단지 운영자는 SCADA(감시 제어 및 데이터 획득) 분석, 오일 찌꺼기 감시, 진동 기반 상태감시를 사용하지만, 그러나 그 결과가 보다 신뢰할 수 있도록 여러 방법들을 자동 방식으로 통합하는 것은 용이하지 않다.
- CM 기법은 쉽게 자동화를 할 수 있어야 한다. 이러한 기법들을 확장

(scalable)할 수 없으면 여러 풍력단지가 있을 경우, 시스템을 관찰하기 위한 많은 수의 풍력단지는 처리할 수 없게 된다.

- 조기 예측 및 교체 결정. 풍력발전 단지는 종종 육상 및 해양에서 모두 물류 문제(logistic issue)가 있다. 결과적으로 CM 기법은 수정 보수 작업(corrective maintenance action) 계획에 오류가 발생하기 이전에 적절한 시간이 필요하다. CM 방식은 조기 경고와 아울러 문제 식별 및 지속적인 모니터링도 CM의 주요 특징이다.
- 경고 표시(alarm) 및 모니터링은 각 풍력터빈에서 과거 기록 데이터를 가지고 설정해야 한다. 각 풍력터빈은 여러 이유로 다른 동작을 하게 된다. 그러므로 수주일 또는 수개월에 걸쳐 과거 경험을 기반으로 O&M을 수행할 수 있도록 각각의 풍력터빈에 대해 개별적으로 측정된 데이터가 필요하다.

## 5. 맺음말

- 풍력터빈 베어링은 부품 교체와 고장으로 인한 정지시간에 많은 영향을 끼침으로 감시(monitor)가 반드시 필요하다. 대부분의 기어박스과 발전기 결합은 베어링 고장에 기인하며, 베어링 교체비용이 정지비용 및 기어박스 및 발전기 교체 비용보다 더 적게 든다.
- 결합이 있는 베어링을 식별하여 미리 교체하면 매우 경제적이다. 풍력터빈 베어링 상태 감시(WTBCM)는 다양한 기법을 이용하는 상용 시스템을 통하여 이루어 질 수 있다. 학계 및 산업체에서 주요 연구 분야 추세는 CMS의 확장성, 응용성 및 자동화, 조기 탐지를 위한 알고리즘과 기법, 스마트 진단 온라인 CMS, 잔존 수명 연구 등이 있다.

출처 : Henrique Dias Machado de Azevedo, Alex Maurício Araújo, 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

## ◁ 전문가 제언 ▷

- 풍력의 활용성이 증가됨에 따라 전력공급에 중요한 축으로 자리 잡고 있다. 그러나 풍력발전기는 발전비용에 비해 유지보수(O&M) 비용이 많이 지출되는 시스템이므로 유지보수 계획을 수립 후 고장정비, 예방정비, 상태 기반 정비를 결정하여 효율적이고 경제적으로 유지 보수하여야 한다. O&M 비용은 육상설치 시 수명 주기 비용의 20-30%, 그리고 해상설치 시 최대 30%의 비용을 차지하는 것으로 알려져 있다.
- 국내에서도 풍력 발전단지에 O&M 서비스를 제공하는 기업이 있다. 베스타스시스템, 지오멘토, 대신풍력(주), 휴니텍, 한국에너지종합기술(주), 로맥스 테크놀로지 등은 풍력발전단지에 대한 진단, 수리, 모니터링, 긴급보수, 부품 수급 등 통합 솔루션을 제공하고 있다. 이들 업체는 소음, 진동, 육안검사뿐 아니라, 유지보수 이력, SCADA 데이터 분석, 내시경 검사 등 발전기의 데이터와 통합 진단 등을 하고 있다.
- 유지보수 및 수리를 위해 풍력 단지를 직접 방문하는 것은 풍력 발전소의 원격 위치, 나셀(nacelle)의 수직 높이 등을 고려해볼 때 높은 비용이 소요된다. 결함과 유지보수 조건을 미리 예측하는 저비용 온라인 상태 모니터링 시스템을 갖추면 유지보수 작업 뿐 아니라 더욱 낮은 비용으로 O&M이 가능할 것이다.
- 특히 베어링은 비용과 신뢰성에 중대한 영향을 끼친다. 본 논문의 자료에 의하면 베어링은 기어박스 결함의 50% 이상을 차지하므로 풍력터빈 베어링 상태 감시(WTBCM)에 대한 최신 기술을 적용, 온라인화하면 고장을 사전에 방지하고 조기 결함을 감지할 수 있으므로 O&M 비용을 상당 부분 절감시킬 수 있는 것으로 생각한다.

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.