

풍력터빈의 단지수준 상태관리를 향한 저속기계의 진단과 예측

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

1. 머리말

- 화석연료의 매장량 고갈과 환경에 악영향 때문에 신재생 에너지원의 중요성이 부각되고 있다. EU는 2020년까지 20%를 신재생 에너지원으로 대체하고, 유럽 풍력에너지협회는 그중 약 14%가 풍력에너지에 의해 충족될 것으로 예측한다. 더 많은 풍력에너지 생산을 위해 풍력단지의 규모가 커지고 개별 터빈용량도 커지게 되고, 풍력단지의 고가용성과 수익성 확보를 위해 선진 정비전략을 채택할 필요가 있다.
- 풍력단지의 운영 및 정비데이터에 대한 중요한 조사가 스웨덴과 독일의 풍력단지와 EU 전역의 터빈에 대해 시작했는데, 그 중 가장 빈번한 실패와 상응하는 고장시간을 살펴보면 풍력터빈 구동 계통 기어박스 및 피치(pitch)와 요(yaw) 시스템이 실패의 약 35%와 고장 시간의 35%를 차지한다.
- 풍력터빈 실패의 약 59%가 기어박스에 관련되고, 그 중 약 70%가 베어링 실패에 기인한다. 적절한 상태 감시(CM: Condition Monitoring) 전략을 선택하기 위해 최첨단 기술의 세심한 조사가 필요하다. CM 기술의 올바른 선택으로 많은 실패가 시작 단계에서 방지될 수 있고 정비비용과 고장시간의 상당한 감소를 유도할 수 있다.

2. 정비 방법론

- 오늘날 존재하는 정비 분야에서 가장 중대한 발전들은 항공우주산업으로부터 도움을 받고 있고, 엄격한 안전과 긴축 재정 통제 때문에 시간이 지나면서 더욱 진화해 왔다.

○ 신뢰성 중심 정비

- 신뢰성 중심의 정비(RCM: reliability centered maintenance)가 시스템 기능을 보존하는 단순한 목적을 가지고 처음으로 정의되었다. 아이디어는 시스템이 기능적 목적을 충족시키는 것을 정지시킬 수 있는 모든 요소들을 결정하고 이들을 근절하는 것이다.
- RCM은 시스템을 부품들로 분해하고 기능적 실패를 야기할 수 있는 중요 실패 모드를 확인한다. 일단 실패 모드가 하위 시스템과 부품 수준에서 확인되면 적절한 정비 과제가 시스템의 안전과 기능성 영향에 근거하여 부품과 하위 시스템마다 선택된다. 올바르게 수행될 때에는 RCM운동은 모든 예측할 수 있는 실패 양상과 실패를 대처하는 시스템을 위한 종합적인 정비 계획을 만들어 준다.

○ 상태기반 정비

- 상태기반 정비는 과잉 계획정비로 인한 정비비용을 낮추기 위하여 우주항공 산업에서 시작되었다. 이것은 부서지지 않았으면 고치지 말라는 아이디어에 근거한다. 장비의 상태가 초기 파괴를 탐지하는 CM 시스템을 사용하여 지속적으로 감시되고 나중에 정비 과제가 확인된다.
- CM 시스템의 진화에 근거해서 이들은 실패 탐지, 실패 진단, 실패 정량화 및 실패 예측의 4개의 수준으로 분류된다. 이 분류에서 진단과 예측은 정비과정에서 혜택의 관점에서 중대한 발전이다. 올바른 진단은 초기 단계에서 결함을 탐지하고 결함 위치를 확인하여 고장 시간을 상당히 줄이고, 예측은 정비 계획에 직접 기여한다.

- 풍력 단지를 위한 CBM 기반 RCM의 개념을 개발하기 위하여 풍력터빈의 각 부품을 평가하는 것이 필요하다. Reliawind 프로그램이 풍력터빈의 분류를 확인하였는데 이것이 현재 풍력터빈 산업계에서 일반적으로 허용되고 있다. 이 분류가 풍력터빈 시스템을 위한 핵심 실패 방식과 적절한 정비 절차의 확인을 위해 사용될 수 있다. 부품 수준으로 축소하고 고 순위 실패 방식을 확인할 필요가 있다.

3. 롤러 베어링 진단

- 풍력 터빈에서 대형 저속 베어링의 피치와 요 시스템의 경우 각각 분당 0.5와 2회전 사이의 속도 범위와, 구동계통의 회전자 단계의 경우는 40 rpm까지 존재한다. 더구나 피치와 요 시스템에서 4점접촉이나 미끄럼 베어링은 간헐적으로 작동해서 결함 진단을 어렵게 한다.
- 진동 신호
 - 중간 및 고속 베어링을 진단할 경우 진동 신호가 널리 사용된다. 롤러 베어링이 결함 부위를 지나갈 때 마다 진동의 충격이 발생한다. 그러나 저속 중에는 소음과 정보사이의 비율이 높아져서 정보를 추출하기가 더 어렵다. 베어링의 결함 위치를 탐지하는 가장 일반적인 방법은 진동 신호의 주파수 스펙트럼을 결함 베어링 주파수 특성과 맞추는 것이다.
 - 모델에 근거한 접근법도 진동 데이터를 사용하여 결함을 진단하기 위하여 사용될 수 있다. 모델에 근거한 접근법이 데이터 근거 접근법에 비해 정확하다는 장점이 있으나 데이터 근거 접근법보다 모사하는데 긴 시간이 걸린다.
- 음향 방출(AE: acoustic emission)은 어떤 수준에서 기계적 열적 응력을 받을 때 재료 내 국부적 근원에서 신속한 에너지 방출에 의해 발생된다. AE는 압전형의 변환기, 증폭기 및 신호처리장치를 사용하여 측정된다. AE 검출법의 진동기술에 대한 큰 장점은 이른 단계에서 무결점의 손실을 탐지하는 능력이다.

4. 기어박스 진단

- 기어박스는 구동계통, 피치 및 요 시스템의 풍력터빈에 필수적인 부하 전송 부품을 형성한다. 풍력터빈 구동계통은 높은 전체 기어 비율을 전달하기 위해 병렬, 중간 및 고속 고정 축 기어박스에 연결된 단일 단계 위성 기어박스로 구성된다. 피치와 요 시스템은 다수의 다단 위성 기어박스로 구성된다.
- 위성 기어박스의 전형적인 실패는 불규칙적인 고 진폭 부하와 부식이다.

구동축의 균열도 보고되었다. 고정 축 기어박스의 진단이 과거 몇 십년간 관심을 끌었지만 위성 기어박스에 대한 관심은 헬리콥터 사용관리 시스템과 위성 기어박스의 실패 전까지 위성 기어박스에 관심을 얻지 못했다.

○ 진동 신호

- 시 계열 방법: 진동센서가 위성 기어박스와 구동 트레인을 위한 CM 시스템의 선택이었다. 진동 신호의 시간 동기 평균에 근거한 기어박스를 위한 여러 가지 상태 지표가 기어박스의 조건을 평가하기 위해 사용되었다. 고정 축 기어박스의 진단은 상당한 진진이 있어서 축 뿐만 아니라 기어의 결함 식별이 잘 확립된 분야이다.
- 빈도와 시간 주파수 방법: 진동 신호의 주파수 스펙트럼 분석은 기어박스에 관한 풍부한 정보를 제공한다. 진동 신호에서 관측되는 기어 맞물림 주파수 측파대(side band)는 결함 있는 기어박스를 진단하기 위한 진단 특성으로 사용된다.

○ 오일 파편 감시는 헬리콥터 기어박스 상태 감시에 인도된 이래 기어박스의 마모 진단에 인기가 있다. 이것은 재순환 윤활유 순환을 갖는 기어박스에 적용된다. 페라이트 입자 센서가 윤활유에 있는 부유입자물질에 근거한 베어링과 기어의 마모를 검출한다. 이들 기술은 손상의 발생을 탐지할 수 있으나 단지 입자 감지만으로는 베어링과 기어박스 사이의 구별은 불가능하다.

○ 음향 방출 기법은 기어 박스 경우보다 베어링 결함 검출에 더 성공적이다. 진동 감지가 도전적이지만 기어박스 경우에는 음향 방출 보다 바람직한 선택이다.

○ 데이터 기반 기술: 대규모 풍력단지와 단지수준 데이터의 가용성이 데이터기반 진단법의 발전에 흥미를 끌게 했다. 현존 CM 시스템과 감시 제어 데이터수집(SCADA: supervisory control and data acquisition)시스템 데이터가 새로운 센서에 자본투자의 필요성을 배제했다.

5. 예측

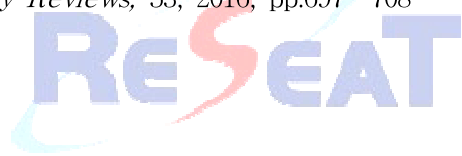
- 진단할 수 있는 출판된 문헌과 CM 시스템이 존재하지만 예측은 문제의 복잡성과 관련된 변수 때문에 아직 초기 단계이다. 예측은 예측 진단으로 정의 되는데 이것은 부품의 잔존 내용 연수 또는 적당한 작동 기간 결정을 포함한다.
- 롤러 베어링 마모 예측: 모델기반 예측은 응력 사이클 수에 대한 균열 성장 변화율을 결정하는 잘 알려진 Paris 법에 근거한다. 데이터 기반 법은 작동 중인 유사한 부품의 마모 역사나 선택된 시편에 대한 가속된 시편에 의존한다.
- 기어박스를 위한 예측은 기어의 접촉력과 피로와 같은 계수로 인한 기어 이빨에서의 균열성장에 가장 초점을 둔다.

6. 맺음말

- 신재생 에너지에 대한 관심의 증가로 대규모 전력망에 연결된 풍력단지가 만들어졌다. 단지수준의 정비전략이 이들 풍력단지를 수익성 있고 신뢰성 있게 운영하기 위해 필요하다.
- 상태 감시와 상태기반 정비는 불필요한 교체와 수리 절차를 삭감하여 정비 비용을 감소하는데 도움을 준다. 그러므로 가능한 한 많은 자격 있는 상태기반 정비(CBM: Condition Based Maintenance) 후보를 상태기반 정비 방법으로 격상하는 것이 중요하다.
- 그러나 CBM을 위한 후보의 주의 깊은 선택이 필요하고 그것은 기술적 실현 가능성뿐만 아니라 금전적 이익에 근거해야 한다. 이런 측면에서 RCM이 상태 감시를 위한 후보의 선택을 안내한다. CBM 기반 RCM은 대형 풍력단지를 위한 상태관리를 실현하기 위한 합리적인 출발점을 제공한다.
- 어떻게 CBM 기반 RCM이 정비 전략으로 풍력 단지를 위해 채택 될 수 있는지의 간략한 설명이 본문에 자세히 기술되었다. CBM으로부터 이익을 누릴 수 있는 중요하고 실패가 발생하기 쉬운 두 가지 부품 즉 저속 베어링과 다단 기어박스를 위한 최첨단 진단과 예측의 검토가 제시되었다.

- 기술들이 단지 수준 실시에 초점을 두어 풍력터빈에 적용 가능성에 근거해서 평가되었다. 문헌에 근거해서 부품수준의 진단을 위하여 한 가지 이상의 감지 방법에 의존하는 것이 합리적인 것으로 보인다.
- 센서 기반과 데이터 기반의 융합 방법은 단지의 다수 풍력터빈에서 오는 데이터에서 장점을 취할 수 있고, 더 정확하고 신뢰성 있는 진단을 결정할 수 있다. 예측은 현재는 초기 단계이지만 미래에 예측을 위해 사용될 수 있는 센서들에 근거한 CM 기술을 선택하는 것이 이로울 것이다. 이런 식으로, 사전 예측으로만 감지 메커니즘에 추가 자본 비용이 발생하는 것을 피할 수 있다.

출처 : Surya Teja Kandukuri, Andreas Klausen, Hamid Reza Karimi, Kjell Gunnar Robbersmyr, “A review of diagnostics and prognostics of low-speed machinery towards wind turbine farm-level health management”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 2016, pp.697~708



◁ 전문가 제언 ▷

- 신재생 에너지에 대한 관심의 증가로 전력망에 연결된 대규모 풍력단지 증가하고 있다. 이들 풍력단지가 신뢰성 있게 효율적으로 작동하기 위해서는 상태기반 정비와 같은 선진 정비전략이 필요하다. 그러나 풍력터빈은 회전기계에 억제 효과를 갖는 불규칙적인 부하패턴, 간헐적인 작동 및 혹독한 날씨 조건에 관해 독특한 어려움이 있다.
- 본문에 풍력 터빈의 2가지 중요한 실패하기 쉬운 부품인 저속 베어링과 유성 기어박스에 관계되는 진단과 예측 분야의 최신 기술을 설명하고 있다. 이 조사는 풍력터빈 단지수준의 상태관리에 적용되는 방법들을 평가하고 신뢰성, 정확성 및 실시 측면과 같은 기준에 대해 이러한 방법들을 비교 검토한다.
- 해상풍력 터빈의 높은 신뢰성과 유효성을 보증하는 한 가지 접근 방법은 진보된 상태 감시와 신뢰성 예측 시스템을 사용하여 RCM (reliability centered maintenance) 전략을 개발하는 것이다. 풍력단지 SCADA(Supervisory Control and Data Acquisition) 시스템이 이 같은 전략을 확립하는데 공헌한다.
- 오늘날 유용한 풍력터빈 실패와 정비 데이터의 양과 깊이는 실제의 정교한 정량적 방법의 적용을 위해서는 불충분하다. 깊이 있는 실패와 정비 데이터가 표준화되고 자동화된 수집이 풍력터빈의 신뢰성, 유용성 및 수익성을 위해 중요한 단계이다.
- 한양대학교의 이윤성 등은 RCM 기법을 풍력 발전기에 도입하여 각 부품의 고장률을 고려한 최적의 유지보수 주기를 결정하는 신뢰도기반 유지보수 계획을 제시하였다.
- 우리나라는 한반도 서남해안에 해상 풍력 단지 조성을 위한 시범단지 운영 계획이 있으나 어민들의 반발로 진전이 느리다. 지구 온난화를 방지하고 충청도와 전라도지역의 산업발전과 조선소의 업무량 확보를 위해 어민들의 동의를 위한 관계 기관의 설득 노력이 필요하다.

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.