

# 풍력터빈의 구조건전성 모니터링 및 결함 진단 방법

한국과학기술정보연구원  
전문연구위원 나덕주  
(djra15@reseat.re.kr)

## 1. 서언

- 현재 세계 전력의 약 2.3%를 풍력단지에서 공급하고 있고, 세계 각지에서 풍력단지의 건설에 힘입어 2020년에는 세계 전력 공급량의 11.5~12.3%에 해당하는 2,600TWh를 생산하고, 2030년에는 21.8%를 점유하게 될 것이다. 2011년 말 중국의 풍력발전 설치용량은 이미 62.73GW를 초과하였고, Sinovel, Goldwind, Dongfang Electric, United Power 등 4개 업체는 세계 10대 풍력터빈 제조업체로 성장하였다.
- 풍력터빈은 수직축 풍력터빈(VAWT: Vertical Axis Wind Turbine)과 수평축 풍력터빈(HAWT: Horizontal Axis Wind Turbine)의 2종류가 있으며, 다른 에너지 자원에 비해 보다 높은 경쟁력을 갖기 위해서는 가용성, 신뢰성, 효율 및 터빈 수명과 같은 성능이 향상되어야 한다. 20년 사용한 750kW 풍력터빈의 운전 정비 비용은 총 에너지 생산 비용의 25~30% 또는 투자비용의 75~90%에 해당한다.
- 풍력산업에서 현재 가장 널리 사용되고 있는 2MW 풍력터빈의 운전 정비 비용은 750kW 풍력터빈 프로젝트 비용보다 12% 적은 수준이다. 풍력터빈의 크기와 개수가 증가하면 검사 및 정비 비용도 따라서 증가하는 중요한 문제로 대두 된다 본문은 발생할 수 있는 결함을 탐구하기 위하여 풍력터빈의 구조와 서로 다른 부품에 대해 설명하고, 각 부품에 발생할 수 있는 결함을 진단하는 방법을 비교 설명한다.

## 2. 풍력터빈의 구조

- 풍력터빈은 3개의 블레이드를 적용하고, 블레이드와 로터는 풍력에너지를

를 기계적 에너지로 변환하고 이 에너지를 주축과 기어박스를 거쳐 발전기에 전달한다. 베어링지지 주축과 기어박스는 전기 생산이 가능하도록 발전기속도를 최적화하는 기능을 가지고 있으며, 요(yaw)시스템은 주축을 풍향에 맞춰 정렬시키고, 나셀은 타워(tower) 상단에 설치된다.

- 누수와 부식과 같은 결함은 육안검사로 쉽게 찾아 낼 수 있다. 부품표면이 변색되어 있으면 온도변화 또는 악화된 상태를 나타내고, 베어링에서 이음이 발생하면 물리적 이상 현상을 의미한다. 그러나 블레이드 표면의 균열, 발전기에서 전기 단락, 증속기의 과열, 베어링 결함, 풍력 에너지 변환 시스템의 결함, 재료의 마모와 피로 현상과 같은 대부분의 결함은 복잡한 탐구 절차가 필요하다. 다음 장에 풍력터빈에서 발생하는 대표적인 결함과 그 결함을 탐지하는 방법에 대해 설명한다.

### 3. 풍력터빈에서 발생하는 대표적인 결함

- 풍력터빈은 바람, 비, 눈 및 다른 가혹한 환경 하에서 작동되며, 바람으로부터 더 많은 에너지를 얻기 위해 풍력터빈 블레이드의 직경을 점점 더 크게 만든다. 이러한 이유로 로터 불균형, 블레이드와 허브에 생기는 부식, 대형 풍력터빈에 생기는 심각한 공탄성 변형과 마찬가지로 블레이드에 직접적인 결함이 발생하게 된다.
- 기어박스는 풍력을 적절한 입력속도로 바꾸어 발전기에 전달하는 기능을 가진다. 현재 상용화된 풍력터빈은 대부분 터빈 로터와 전기 발전기 사이에 고정 기어 비를 사용하여 작동된다. 일정 속도의 발전기와 함께 가변 기어박스(VRG: Variable Ratio Gearbox)는 로터 속도를 간헐적으로 변하게 하고, 보다 높은 공기역학적 효율을 달성하도록 해 준다.
- 기어박스는 높은 입력속도와 동력전달 비를 얻기 위하여 일반적으로 유성기어 방식으로 설계한다. 기어박스는 과도한 하중조건, 맞바람, 먼지에 의한 부식, 기어박스의 손상과 같은 열악한 운전 조건하에서 장기간 작동되기 때문에, 풍력터빈 기어박스는 축의 불균형, 축 정렬불량, 축 손상, 베어링 손상, 기어 파손, 축 파손, 오일 누수, 높은 오일 온도, 미흡한 윤활과 같은 여러 가지 결함이 발생하게 된다.

- 발전기는 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환한다. 발전기에는 농형 (squirrel cage) 유도발전기, 브러시리스 이중여자 유도발전기(DFIG), AC 여자 발전기, 동기발전기 등이 있고 이 중에서 이중여자 비동기 모터를 가장 보편적으로 사용한다. 발전기는 전자기 환경 하에서 장기간 사용되기 때문에 발전기 과다 진동, 발전기 과열, 베어링 과열, 비정상적인 소음, 절연 파손과 같은 결함이 자주 발생한다.
- 베어링은 풍력터빈의 발전기 또는 기어박스처럼 회전기계에서는 대단히 중요한 부품이다. 예측하지 못한 동적 응력에 기인하여 베어링에 조기 마모가 발생하면 정비비용이 증가하거나 때로는 막대한 비용이 수반되는 터빈 파손에 이르기까지 한다. 또 베어링에 과열이 생기면 터빈 베어링의 운전 성능에 큰 영향을 미치기도 한다.
- 블레이드 펄링(furling) 및 전자기 브레이크에 의해 축 속도를 낮춘 후 최종적으로 기계식 브레이크가 작동된다. 기계식 브레이크가 없이 최고 속도에서 브레이크를 사용하면 부품들이 급격히 마모된다. 즉 제한 속도를 넘어 작동되면 기계 장치와 블레이드에 심각한 손상이 발생하게 된다. 유압장치에 결함이 생기면 브레이크가 걸린 채로 있거나 풍력터빈의 운전 정지시간이 길어지게 된다.

#### 4. 대표적 구조건전성 모니터링 및 결함진단 방법

- 최근 풍력터빈 설계에는 공기역학과 구조 동역학을 효율적으로 결합한 공탄성(aeroelastic) 분석을 적용하고 있다. 공탄성 분석에는 가상 모드 형상 방법 등이 있지만 직경이 큰 풍력터빈의 설계에는 적합하지 않다. 대형 풍력터빈의 경우에는 유체-구조 상호작용 분석과 같은 공기역학적 모델에 ANSYS 소프트웨어를 사용하여 블레이드의 거동을 분석하고 이를 바탕으로 공탄성 분석과 풍력터빈의 성능을 예측할 수 있다.
- 블레이드는 전체 풍력터빈 비용의 15~20%를 차지하고, 통상적으로 발생하는 결함인 균열은 진동에 기반 한 모니터링 방법에 의해 점검한다. 비회전 및 비선형 신호로부터 상태 특성을 추출하기 위해 WT(Wavelet Transformation), WVD(Wigner-Ville Distribution), EMD(Empirical Mode Decomposition)와 같은 신호처리 방법을 사용한

다. 풍력터빈 블레이드의 균열 진단에는 신호를 고유 기능으로 분할하는 EMD 방법이 가장 민감하고 적절한 방법으로 알려졌다.

- 구조건전성 모니터링(SHM: Structural Health Monitoring)은 주로 토목 및 항공 분야에서 스마트재료 개발에 사용하는 다자 학문 연구 분야이다. SHM의 장점을 이용하기 위해서는 연속적인 온라인 모니터링이 필요하다. 대부분의 검사 기법은 생산한 후 또는 정지 상태에서 검사에 적합한 방법이다. 현재 블레이드의 연속적 모니터링에는 사용 가능한 방법은 음향방출 모니터링 및 변형량 모니터링 방법 등이 있다.
- 동력전달계통의 결함은 진동분석 방법으로 진단한다. 유성기어 결함은 시간영역 평균 방법으로 진단하고, 기어 균열 및 비정지 기계적 결함은 시간-주파수 분석방법으로 탐지한다. 유성기어는 진동 신호의 스펙트럼이 복잡하여 유성기어의 결함을 정확하게 진단하는 것이 대단히 어렵기 때문에, Zhipeng Feng은 EEMD에 기반을 두고 진폭과 주파수를 함께 복조 분석하는 방법을 제안하였다.
- 상태감시시스템(CMS: Condition Monitoring System)은 일부 부품의 결함 모드를 예측할 수 있지만 모든 부품의 결함모드를 예측할 수는 없다. 따라서 부가가치를 정량화하고 정비 정책을 정의할 때는 CMS 성능의 유효성을 고려할 필요가 있다. CMS 시스템은 교육모듈, 예측모듈, 비정상 감지모듈, 퍼지 전문가 모듈로 구성되어 있으며, SCADA 데이터 수집과 감독제어에 의해 결함을 예측할 수 있다.
- 풍력터빈은 가변속도 및 가변부하 조건에서 가동되기 때문에 일반적인 신호처리 방식을 수정하여 적용한다. Villa는 결함의 중요도 수준에 따른 통계적 진단 알고리즘을 적용하여 불균형 및 오정렬(misalignment)과 같은 미세한 결함을 검출하였다. 또한 결함 상관관계 분석에 기반을 둔 전문가 시스템을 적용하여 기어박스의 결함을 정확한 시점에 정확하게 진단하고 필요한 시점에 해법을 제시할 수 있었다.
- 상태감시는 보통 부하변동과 연동되어 신뢰성을 확보하기 어렵다. 유도기계는 AC 전류를 사용하여 묘사할 수 있다. 시스템에 저장 및 방출되는 전력은 무효전력이라 하고, 시스템에서 전기저항으로 추출하는 전력

을 유효전력이라 한다. 겉보기 전력(apparent power)에 대한 유효전력의 비율을 출력계수(power factor)라고 부르며, 이는 기계의 에너지 전달 성능을 반영할 뿐 아니라 기계의 건전성을 의미한다.

- 풍력발전이 전력 계통의 동특성에 미치는 영향을 탐구하기 위하여 각각의 풍력터빈 발전기의 동특성을 수용하는 적절한 등가 모델을 개발할 필요가 있다. 직접발전 시스템의 동특성을 연구하기 위하여 가변속도 직접구동 영구자석 동기발전기를 가진 풍력단지의 동특성 모델링과 제어 방법을 제시하였다. 모듈형 컨버터의 신뢰성을 모델링하고 분석하기 위해 Markov 모델링 방법을 적용하고 있다.
- 베어링결함을 식별하는데 사용하는 데이터마이닝 기법은 정상거동 모델을 사용하여 5가지 과열 경우의 분석을 통해 결함발생 1.5시간 전에 예측할 수 있는 방법이다. 속도가 한계치를 넘으면 제동결함에 기인하여 블레이드와 기계부품에 심각한 손상을 일으키게 된다. 전압과 전류에 기반을 둔 기계식 브레이크의 상태 모니터링은 정비 스케줄링을 최적화할 수 있고, 고장수리에서 돌발고장의 위험을 최소화할 수 있다.
- 대형 풍력터빈을 개발하고 있는 풍력자원 국가에서는 전력망 운전에서 풍력 에너지가 미치는 영향 때문에 계통연계 규정의 개발을 필요로 한다. 최근 계통연계 규정은 대규모 풍력발전 단지의 송전 시스템 운영자에 의해 더욱 강화되고 있다. 또한 지역사회에 기반을 둔 미세 전력망 연결 풍력터빈을 위해, 복합 태양광 및 복합 열 및 전력 발전에 관한 표준 모델이 수립되어 있다.

## 5. 결함진단 방법의 장단점 비교

- 결함진단을 통해 특성을 추출하기 위해 진동분석 즉 시간-주파수 분석 방법을 적용한다. 이 방법은 예상되는 영향을 찾아내는 중요한 역할로서, 블레이드 균열 진단에는 EMD 방법을 사용하고, 위성 기어박스 결함 진단에는 EEMD 방법을 사용하고, 진동분석에 의한 통계적 결함 진단 방법 등을 사용한다. 한편 SCADA 컨버터로부터 채취한 전압 전류 대량 데이터를 사용하여 풍력터빈 정상상태를 분석 및 판단할 수 있지만 이 데이터로부터 인식한 효율은 진동 데이터보다 오히려 낮다.

- 결합 메커니즘은 복잡하기 때문에 전압 또는 전류에 의해 한 번에 결합 위치와 형상을 정확하게 찾아내는 것은 대단히 어렵다. 이러한 문제를 해소하기 위해 NN(Neural Network) 방법이나 ES(Expert System) 방법을 사용한다. 풍력터빈의 진단에는 온라인 모니터링이 중요하며, 유도발전기의 결합진단을 위한 전압 전류 분석 방법도 그 중 하나이다. 또 동적 모델분석 방법에 의해 터빈 부품의 결함을 진단할 수 있다.
- 미래에는 풍력터빈의 복잡한 운전 환경을 고려한 좀 더 효과적인 방법이 요구된다. 즉 잡음과 간섭에 의한 방해를 제거하고, 전형적인 조건 하에서 유용한 특성을 추출할 수 있고, 하이브리드 변수에 의해 가동되는 풍력터빈은 직접 수집한 신호를 비 정지 및 비선형 특성과 결합하여 분석하여야 한다. 또 풍력터빈의 결합진단에는 NN, ES, SVM과 같은 기계학습방법과 결합된 지능적인 방법을 적용하고, 회전기계의 결합진단방법을 개선하여 풍력터빈 분야에 적용할 필요가 있다.

## 6. 결론

- 본문에 지난 3년 동안 풍력터빈의 구조건전성 모니터링 및 결합 진단 방법에 대하여 설명하였다. 먼저 풍력터빈의 모든 부품에 관해 대표적인 구조 및 결함을 자세하게 검토하고, 시간-주파수 분석 방법, 진동에 기반을 둔 방법, 전압과 전류에 기반을 둔 방법과 같은 풍력터빈 부품의 진단에 관한 연구 결과를 분석하였다.
- 진단 효율과 정밀도가 우수한 완전한 방법을 찾기 위하여 새로 적용하는 방법의 장점과 단점을 자세하게 비교하였다. 최근의 새로운 방법과 기계 학습방법을 결합한 새로운 현명한 방법이 개발되어 풍력터빈의 결합 진단에 도입될 전망이다.

출처 : W.Y.Liu, B.P.Tang, J.G.Han, X.N.Lu, N.N.Hu, Z.Z.He, "The structure healthy condition monitoring and fault diagnosis methods in wind turbines: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 2015, pp.466~472

## ◁ 전문가 제언 ▷

- 세계 전력의 약 2.3%가 풍력에서 공급되고, 2013년 세계 풍력발전 설치용량은 318GW이었고, 2020년에는 세계 공급량의 11.5~12.3%에 해당하는 2,600TWh를 생산할 전망이다. 지난 10년 동안 풍력발전은 매년 20~30% 성장하였고, 미국은 2030년에 총 전기의 20%를 풍력에서 조달하고, 유럽은 2030년까지 400GW의 풍력전력을 생산할 예정이다.
- 대표적인 2MW 풍력터빈의 운전 정비비용은 750kW 풍력터빈 프로젝트 비용의 88% 수준이다. 풍력터빈의 크기와 개수가 증가하면 검사 및 정비 비용도 증가하게 된다. 본문은 발생할 수 있는 결함을 탐구하기 위하여 풍력터빈의 구조와 구성 부품에 대해 설명하고, 각 부품에 발생할 수 있는 결함을 진단하는 방법을 비교 설명한다.
- 최근 풍력터빈 설계에는 공기역학과 구조 동역학을 효율적으로 결합한 공탄성(aeroelastic) 분석을 적용하고, 풍력터빈 블레이드의 균열 진단에는 신호를 고유 기능으로 분할하는 EMD 방법이 가장 민감하고 적절한 방법으로 알려졌다. 동력전달계통의 결함은 진동분석 방법으로 진단하고, 베어링결함의 식별에는 데이터마이닝 기법을 적용한다.
- 구조건전성 기술은 항공기나 풍력터빈 등 구조물의 구조적 상태를 연속적으로 감시하기 위해 구조물 내에 센서를 내장하거나 비파괴 검사 등을 통해 결함을 탐지하는 기술이다. 풍력터빈 진단 시 결함 판정의 신뢰도를 높이고 센서 고장 시 상호보완 방법으로 사용하기 위하여 발전기 토크와 발전기 회전 속도를 진단 방법에 추가적으로 이용한다.
- 세계 3대 해상풍력 강국으로 도약하기 위해 국내 풍력발전 기업들도 풍력터빈의 모든 부품에 관해 대표적인 구조 및 결함을 자세하게 검토하고, 시간-주파수 분석 방법, 진동에 기반을 둔 방법, 전압과 전류에 기반을 둔 방법과 같은 풍력터빈 부품의 결함 진단방법을 개선하여 풍력터빈 분야에 적용할 필요가 있다.

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.