

대형 풍력터빈의 시스템 안전 분석

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

1. 머리말

- 풍력에너지는 얼마 전부터 세계에서 가장 급격히 성장하는 재생에너지원이 되었다. 2013년 말 전 세계 총 풍력에너지 용량은 약 328GW로 세계 전기 수요의 약 3%를 차지한다.
- 그러나 혹독한 운전 환경 때문에 대형 풍력터빈은 주 베어링, 기어박스 및 발전기 등에서 여러 종류의 실패를 경험한다. 더구나 교통 불편, 정지 시간은 에너지 비용에 막대한 영향을 준다. 그래서 풍력 산업의 신속한 발전을 위해 장비의 고 성능과 신뢰성이 요구된다.
- 만약 신뢰성 있는 작업이 보장될 수 없으면 풍력터빈의 실제적 이용도는 감소하고 운전 및 정비(O&M: Operation and Maintenance) 비는 증가해서 양자가 풍력 전력의 경제적 혜택을 크게 감소시킬 것이다.

2. 부품

- 풍력에너지는 로터를 구동하고 이것이 발전기에 연결되어 구동축을 통하여 전기를 생산한다. 풍력터빈은 에너지를 포착하기 위하여 대부분 타워 위에 탑재된다. 주요 부품은 아래와 같이 4가지로 구분된다.
- 로터 부품은 풍력에너지를 저속 회전 에너지로 변환하기 위한 블레이드를 포함하고, 구동 부품은 기어박스(예 유성 기어박스), 저속 입력 회전을 발전하기에 적당한 고속 회전으로 변환하기 위한 조정 가능 속도 구동 또는 무단 변속기 부품을 포함한다. 또 발전기 부품은 발전기와 전자 제어장치를 포함하고, 구조 지지 부품은 타워와 요 메커니즘을 포함한다.

3. 분석의 종류

- 실패 분석: 실패 분석은 실패의 원인을 결정하기 위하여 데이터를 수집하고 분석하는 과정이다. 그것은 신제품 개발과 현존 제품의 개선에 사용되는 필수적인 도구이다. 사고의 원인을 명확히 하고 그러한 제품 실패를 방지하는 방법을 추구하기 위하여 많은 시험과 연구가 수행되는 과정에서 실패 분석 기술도 발달하였다. 제품이 점점 더 복잡해지면서 실패 분석도 현저한 초점이 되었다.
- 신뢰성 분석: 신뢰성은 주어진 물건이 주어진 상태 하에서 주어진 기간의 시간 동안 의도된 기능을 수행하는 확률로 정의된다. 그러므로 확률적 방법이 규정된 전력 품질 표준에 근거하여 풍력발전 시스템의 연속적인 전력 공급 능력을 분석 또는 평가하기 위하여 사용된다. 신뢰성 분석은 시스템의 실패 확률을 정량화 하고 시스템 신뢰성을 증진하는 방법을 추구하는 것이 목적이다.
- 위험 분석: 위험 분석은 위험을 확인, 분석 및 평가하는 과정이다. 위험은 발생 확률에 해당하는 사건의 결과(상황 변화 포함)에 따라서 표현된다. 모든 종류의 복잡한 시스템 공학에서 위험 분석 시스템은 특히 인명, 환경 또는 장비 운영에 관계된 공학에서 안전과 신뢰성 공학을 향상시키기 위해서 사용된다.

4. 기본적인 방법

- 모사 기반 방법론
 - 풍력터빈 분석은 공기 역학, 구조 역학, 유체 역학, 제어 및 구동렬 역학 등이 포함된다. 풍력터빈은 특별한 구조와 작업 환경 때문에 다른 복잡한 기계적 장비와 다르다. 그러므로 중요한 이론이 공기 역학, 구조 역학 및 유체 역학에 관계된다.
 - 공기 역학
 - 풍력터빈의 주요 응용은 바람에서 에너지를 추출하는 것이다. 그러

므로 공기 역학은 풍력터빈의 매우 중요한 측면이다.

- 블레이드 요소 모멘텀(BEM: Blade Element Momentum) 이론: BEM은 블레이드 요소 이론과 모멘텀 이론을 조합한다. 그것은 프로펠러나 풍력터빈 블레이드에 작용하는 국부적 힘을 계산하기 위해 사용된다. 블레이드 요소 이론은 로터에 유도된 속도를 계산하는데 어려움을 완화하기 위해 모멘텀 이론과 조합된다.
- 일반화된 후류 역학(GWD: Generalized Dynamic Wake)은 라프라스 식에 대한 잠재적 유동 해법에 근거한다. BEM 해법에 대한 GWD의 주요 장점은 후류 역학 효과, 팁 손실 및 편향된 후류 역학의 고유 모델링을 포함한다.

- 구조역학

- 유한요소법(FEM: Finite Element Method): 유한 요소 분석(FEA)은 잠재적(또는 존재하는) 구조나 성능 문제를 발견하고 해결하는 것과 같이 가상 환경에서 제품과 시스템을 모델하기 위해 사용된다.
- 다물체 시스템(MBS: Multi-Body System): MBS는 각각이 큰 병진 및 회전 변위를 이행하는 상관된 강직하거나 유연한 물체의 역학적 거동의 연구이다. 동적 거동은 적용된 힘과 모멘텀 변화율의 균형에 의해 만들어진다.

- 유체역학

- Morison 공식(ME): ME는 왕복하는 유체 내에 있는 물체에 일직선으로 작용하는 힘을 위한 반 경험적 공식이다. ME는 국부적 유동 가속도와 위상이 일치하는 관성력과 순간 유속의 제곱에 비례하는 항력의 합이다.
- Stoke의 파도 이론: Stoke파는 상수 평균 수심의 무점성 유체층에 비선형 주기적 표면파이다. 이것은 비선형파도 운동을 위한 근사해법을 얻는 섭동 연쇄 접근법을 사용하여 파도 운동학(자유 표면 평가 및 유동 속도)을 결정한다.

○ 상태 감시와 결함 진단

- SCADA

- 감시제어 데이터 획득(SCADA: Supervisory Control and Data

Acquisition)은 풍력터빈 상태 감시에서 가장 일반적인 관행이다. 이것은 풍속, 온도 및 전력 출력을 포함한 역사적 데이터에 근거하여 풍력터빈의 상태를 감시한다.

- 어떤 SCADA 시스템은 진동과 오일 잔해 감시 데이터도 포함한다. SCADA는 손상이 누적된 율과 같은 시스템의 상태와 풍력터빈 작업 상태(속도, 온도 및 전력)를 관련짓기 위해서 사용된다.

- CMS

- SCADA 시스템 외에는 진동 기반 상태 감시 시스템(CMS: Condition Monitoring System)도 풍력터빈 기어박스에 널리 쓰인다. CMS는 시스템 부품들이 어떤 상태에 있는가를 말하는 도구이다.
- CMS는 실패 전에 시간에 맞추어서 실패를 탐색할 수 있고 기어박스 안에 어느 부품이 손상이 되었는가를 예측할 수 있다. CMS 기술의 기본은 진동 분석, 오일 분석, 온도 기록계, 재료의 물리적 상태, 변형률 측정 및 음향 감시이다.

- 데이터 원

- 덴마크와 독일의 조사인 WSDK와 WSD가 25년의 작업에 걸친 기어 및 직접 구동을 가진 고정 및 변속 풍력터빈의 실패율에 대한 데이터를 포함하고 있다.
- 유럽의 Reliawind 조사가 35,000 정지 시간의 형태로 기어 구동인 약 350 육상 변속 풍력터빈을 구성하는 450 풍력단지 월의 데이터를 갖고 있다.

5. 연구 현황

○ 안전 분석을 위한 모사

- 결함을 위한 모사: 모사에서 일반적인 절차는 다음과 같다. (1) 공기탄성 결함 분석 모델에 근거한 풍력터빈 시스템에 작용하는 하중의 연산. (2) 시스템이 실패할 것인가를 분석하기 위한 유한요소나 다물체 시스템을 사용하여 풍력터빈 시스템의 핵심 부품에 작용하는 하중의 연산.

- 신뢰성을 위한 모사: 블레이드에 대하여는 실패의 모사에 근거한 블레이드 피로 실패의 분석을 위한 확률 모델이 Miner 규칙 접근법에 근거하여 제시되었다. 반면 로터 블레이드의 면 외 방향 굽힘에서 실패 확률은 1차 신뢰성 방법에 의하여 계산될 수 있다. 기어박스에 대해서는 신뢰성 분석이 다물체 모사법에 근거한 1차 신뢰성 방법(FORM)에 의하여 수행되었다.

○ 안전 분석을 위한 상태 감시와 고장 모사

- 실패의 상태 감시와 고장 진단: 상태 감시와 고장 진단에 근거하여 풍력터빈의 핵심 부품의 실패가 신호 탐색에 의해 결정될 수 있다. 기어박스에 관해서는 SCADA와 CMS 데이터에 근거한 결함 진단법이 연구되었다.
- 신뢰성을 위한 상태 감시와 고장 진단: 고장 유형 영향분석(FMEA)법이 많은 다른 전력 발전시스템의 신뢰성을 연구하기 위하여 사용되었다. Windstats 데이터에 근거한 연구가 기어박스, 발전기, 로터 및 주베어링이 실패당 정지 시간의 약 67%를 차지하는 것을 보여준다.

- O&M이 풍력터빈의 안전 분석을 위한 목표이다. O&M의 유용성과 비용은 에너지 비용에 중요한 기여 인자이다. 주요 기여자는 구조물의 생애를 통한 예상 총 비용을 최소화하는 결정을 하기 위한 기본 방법에 근거해야 한다.

6. 맺음말

- 풍력터빈의 핵심 부품인 로터, 발전기, 전기 제어, 유압 기계, 기어박스, 전력망과 전기 시스템, 요 시스템, 피치 제어 시스템, 타워, 기초, 나셀, 기계적 브레이크 및 주축은 상태 감시와 결함 진단에 근거하여 실패를 측정할 수 있다.
- 측정 기반 안전 분석은 종합적이지만 이것은 사후 분석이고 확실하게 인정된 규칙을 얻기 위하여 많은 측정이 요구된다. 모사에 대해서는 모

텔링의 단순화 때문에 모든 부품이 분석되지 않지만 사전 분석의 장점이 있다.

- 위험 분석보다 실패 분석과 신뢰성 분석이 풍력터빈의 안전공학에 더 사용된다. 풍력터빈의 위험 분석에 관한 연구는 비교적 적은 편이다. 운전과 정비(O&M)가 풍력터빈의 안전 분석을 위한 목표이다. O&M 비용 감소가 에너지 비용에 상당한 기여를 한다. 안전 분석은 풍력터빈을 위해 엄청난 혜택을 가져 올 수 있다.

출처 : Xin Jin, Wenbin Ju, Zhaolong Zhang, LianxinGuo, Xiangang Yang, "System safety analysis of large wind turbines", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 2016, pp.1293-1307



◁ 전문가 제언 ▷

- 풍력터빈은 전 세계 전기소비의 약 3%를 공급하는 전력 에너지 수확 기술을 가진 청정 에너지원이다. 결과적으로 풍력터빈에 대한 요구와 기대는 계속 증가하고 있다. 그러나 풍력터빈의 가혹한 작업환경 때문에 대형 풍력터빈은 여러 유형의 실패를 경험하고 있다.
- 안전공학은 풍력에너지가 전통적인 자원에 비해 경쟁력을 갖고, 요구되는 신재생 에너지 목표를 달성하기 위하여 중요한 문제이다. 본문은 더 많은 전문가가 현재 연구 현황을 알고, 관련 연구자들을 위해 지침을 제공할 목적으로 주요 기본 연구 종류와 방법 및 시스템분석에 관련된 응용을 검토하였다.
- 한전연구원의 J-Y Paek 등은 설계정보를 갖는 통계적 방법과 바람 상태의 변동성 영향을 포착하는 실시간 측정기반 학습 알고리즘을 조합한 풍력터빈을 위한 새로운 블레이드 감시 방법을 제시하였다. 이 블레이드 감시 시스템은 전남 부안군 서해의 2.5GW 해상풍력단지를 위한 SCADA 시스템의 핵심 감시 기술로 사용될 것이다.
- 군산대학교 선민영등은 ANSYS Workbench를 이용하여 5MW급 해상풍력발전 시스템을 탑재하는 자켓형 하부 구조물의 최적 설계에 대한 해석 결과, 극한 하중 경우에 구조물은 변형량이 1 이하로 나타나서 허용응력 설계 법으로 분석 수행한 결과 안전성을 확보한 것으로 확인되었다.
- 허브, 발전기, 센서, 브레이크, 요 시스템 및 구조물의 보고된 실패율은 다른 연구들 사이에 변화가 크지 않다. 블레이드, 제어시스템 및 전자 부품은 실패율과 관련해서 가장 자주 인용되고 기어박스, 발전기 및 블레이드는 정지 기간과 관련해서 가장 정지 시간이 길다.
- 해상풍력단지의 안전은 혹독한 태풍과 파도 및 조류의 영향을 받으므로 설계 단계부터 고도의 신뢰성 분석, 실패분석 및 위험분석이 수행되고 SCADA와 CMS가 고려되어야 해상풍력의 O&M 비용을 감소하여 경쟁력을 갖게 될 것이다.

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.