

대형 풍력터빈의 수명 예측을 위한 측정기법

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

1. 서언

- 해상풍력터빈(OWT, offshore wind turbine)이 다른 에너지자원에 비해 경쟁력을 갖기 위해서는 에너지 비용을 감축하여야 한다. 풍력터빈의 용량을 크게 하고 개수를 줄이면 총 에너지 비용을 줄일 수 있기 때문에 풍력터빈의 사이즈를 크게 만든다. 해상풍력터빈의 블레이드, 나셀 및 타워는 해상 운송으로 크기에 제한을 덜 받기 때문에 해상용 풍력터빈은 육상용 풍력터빈에 비해 크기를 크게 할 수 있다.
- 새로운 재료와 기술의 개발에 힘입어 풍력터빈의 사이즈를 크게 할 수 있다. 현재 가장 큰 로터는 삼성의 7MW 터빈으로 길이가 171m에 달하고, 최대 발전기는 Vestas의 8MW용 발전기이며, 이 대형화 추세는 더욱 더 확대될 전망이다. 그러나 풍력터빈의 크기를 크게 할 경우 고장률이 증가한다. 즉 1993년부터 2004년 사이에 5MW 이상의 대형 풍력터빈을 사용하게 되면서 고장률이 급증하는 경향을 보이고 있다.
- 풍력단지 운영자들은 해상풍력단지에 점차 더 큰 풍력터빈을 채택하고 있다. Statkraft는 Siemens의 3.6MW, 88개로 구성된 Sheringham Shoal 풍력단지를 운영하고 있고, 최근 Statoil과 함께 67개의 Siemens 6MW 풍력터빈을 사용한 Dudgeon 풍력단지를 건설하고 있으며 2017년에 상업운전을 시작할 예정이다. Dudgeon 풍력단지는 현격한 비용 절감이 기대되며, Statkraft는 추가로 3개 프로젝트를 준비하고 있다.
- 대형 풍력터빈에 관련된 리스크를 줄이고 Dogger 은행의 풍력터빈 기술 자격을 취득하기 위해 Statkraft는 Smola 지역의 Haugsoya 섬에 시험용 터빈의 설치를 계획하고 있다. Smola는 Kristiansund 시 북쪽에

위치하고 해상과 유사한 바람의 조건을 가지고 있다. 사용할 풍력터빈의 용량은 6~8MW, 허브 높이는 100~130m, 블레이드 직경은 140~180m이다.

- 시험용 대형 육상풍력터빈의 목적은 측정된 결과와 운영 경험을 활용하여 장차 해상풍력단지용 로터의 직경을 키우는 것과 관련된 리스크를 줄이고자 하는 것이다. 안전하고 신뢰성 있는 운전을 보장하고, 시스템 수명을 연장하기 위하여 동적 상호작용, 상응하는 구조적 거동 및 반응하는 특성을 이해하는 것이 중요하다.
- 육상풍력터빈에서 습득한 지식을 수치적 방법으로 변환하여 해상풍력터빈에 적용한다. 구조물에서 측정된 결과와 수치적 시뮬레이션 결과를 비교하여 검증방법을 구축한다. 측정 하중은 지지 구조물과 결합된 풍력터빈의 상응부하와 관련된다. 고유 모드와 감쇄에 대한 고 품질 평가를 얻기 위하여 측정하기 전에 시뮬레이션 모델을 사용하여 정량적으로 시스템을 평가한다.
- 시험용 풍력터빈의 하중 측정 결과를 사용하여 풍력터빈 주요 부품의 수명 예측 특히 잔여 수명 예측 모델을 검증할 수 있다. 풍력터빈 주 베어링과 구동계통의 고장률에 기인하여 상태 감시 시스템을 MW 규모 풍력터빈의 표준 장비로 제공할 수 있다. 상태 감시 시스템을 시험용 터빈의 상세 측정을 통해 습득한 지식과 결합하여 현재의 상태 감시 상태를 개선하여 미래 프로젝트에 활용할 수 있다.

2. 측정 방법

- 무엇을 조사하는가에 따라 대량의 측정량이 필요하므로 측정 활동은 경우에 따라 서로 다르게 된다. 보통 타워 기초 및 상부에 굽힘 모멘트와 블레이드 뿌리 부분에 블레이드의 굽힘 모멘트와 같은 부하를 측정하고, 구동 계통은 주축의 굽힘 모멘트와 토크를 측정한다. 만일 시뮬레이션 소프트웨어 또는 분석의 검증이 목적이라면 풍력 장은 물론 상응하는 부하를 측정한다.

- 풍력터빈과 같은 유연한 구조물로부터 직접 가진 부하(excitation load)를 측정하는 것은 불가능하다. 블레이드의 가진 부하는 로터 전체를 커버하는 난류 풍력장의 공간 수량에 따라 달라지고, 가진 부하를 추출하기 위하여 유연한 블레이드의 동적 반응을 검토한다. 로터가 커버하는 면적이 커지면 풍속의 변화도 커지게 되므로 들어오는 바람을 측정하기 위해 여러 방법을 사용한다.
- 바람을 측정하는 가장 간단한 방법은 허브 위치에서 내장형 풍속계를 사용하거나 나셀 후방에 설치된 풍향계를 사용할 수 있다. 이 방법은 풍력장이 로터 주위에서 교란되기 때문에 그다지 정확하지 못하다. 로터 상 방향으로 교란되지 않은 풍력 장을 얻기 위하여 나셀에 장착된 풍속계에서 채취한 데이터는 수정이 필요하다.
- 풍속 광선 레이더 및 컵형 풍속계로부터 측정된 평균 풍속은 서로 잘 일치하고 있으나 난류 수준은 잘 알려지지 않고 있다. 난류를 측정할 때 발생하는 오류는 첫째 광선 레이더로 풍속을 측정할 때 대량 데이터의 평균값을 구하는 것과, 둘째 Reynolds 응력센서(stress tensor)의 옆 방향 성분에 의해 오염되기 때문이다. Pena 등은 컵형 풍속계에 비해 광선 레이저에 의해 측정할 때 더 적은 난류 값을 얻었고, Sathe 등은 펄스형 광선 레이저를 사용하여 난류 스펙트럼을 측정하였다.
- 풍력터빈의 반응을 탐구하는데 난류가 가장 중요한 인자이므로 난류를 측정하는 방법을 확립하기 위해 많은 노력과 투자를 하고 있다. 한 가지 방법은 임의의 포인트에 대해 3개의 광선 레이저로 스캐닝하여 더 높은 주파수 난류를 획득하는 것이고, 또 다른 방법은 펄스형 광선 레이저에서 빔의 개수를 증가하는 방법이다. 산업현장에서는 한 개의 광선 레이저를 사용하는 두 번째 방법을 더 선호한다.
- 운영 모드 분석(OMA, operational modal analysis)은 구조물의 반응 측정에 의해 모드 변수를 추출하는 실험적 모드 분석 방법 중 하나로 Carne 등에 의해 개발되었다. 이 방법은 풍력터빈처럼 대형 구조물에 적합하여 작동 가진 하중의 측정을 시도한다. 모드 변수의 예측 기법은 SSI(Stochastic System Identification) 및 EFDD(Enhanced Frequency Domain Decomposition) 두 가지 방법이 있다.

- 구조물에 대한 풍력의 여기(excitation)는 단순히 확률적 문제가 아니고, 블레이드 샘플링과 로터 불평형으로부터 채취한 결정론적 입력은 1P, 3P, 6P 등 주파수에서 명백하게 나타난다. 이는 시스템 모드의 형태로 모델링한다. OMA의 또 다른 단점은 장기간 이력이 필요하고, 운전 조건의 변동성이 작아야 하는 점이다. 풍력터빈에서 여기 시간은 대표적으로 30초이고, 피치 및 발전기 토크 반응은 10초로 고정한다.

3. 측정 장비

- 부하 측정에는 가속도계와 스트레인 게이지를 주로 사용한다. 샘플링률(sampling rate)에 대한 논의와 함께 광학적 측정기법과 새로운 측정방법에 대해 기술한다. 샘플링률은 무엇을 측정하려고 하는가에 따라 달라진다. 타워 부하 측정에 대해서는 1차 타워 주파수가 최소이고, 대형 해상풍력터빈 구조물에 대해서는 2차 타워 모드가 가장 중요한 역할을 한다. 10MW DTU의 자연 고유 진동수의 경우, 최대 정격 로터 속도는 9.6rpm 이고 0.16Hz는 1P, 0.48Hz는 3P, 0.96Hz는 6P에 해당한다.
- 풍력터빈 구조물의 샘플링률은 훨씬 높다. Hansen은 샘플링 주파수를 25Hz로, Damgaard는 10Hz로, Koukoura는 기초에 대해 20Hz로 또 타워, 축 및 블레이드에 대해 35Hz로 측정하였다. Alpha Ventus는 50Hz 측정 주파수를 사용하였다. 2차 타워 벤딩 모드 주파수는 대략 2.5Hz이고, 노이즈가 없도록 아날로그 필터를 사용하여 샘플링률은 25Hz로 측정하였다.
- 가속도계는 구조물의 진동값을 측정하는 계기로, 튼튼하고 광범위한 주파수 영역을 가지며, 보정하기 쉽고 가격이 비교적 싼 편이다. 진동, 충격, 운동, 지진 등 측정 대상에 따라 다른 종류의 가속도계를 선택한다. 압전 가속도계는 수 Hz에서 30kHz의 진동을 측정하는데 사용하고 스트레인 게이지는 변형률을 측정하는데 사용한다. 대상물이 변형을 일으키면 전기 저항이 변하고, 스트레인 게이지의 전기 저항값에 의거 응력을 추정할 수 있다. Damgaard는 나셀의 토양 댐핑을 예측하기 위해 2개의 가속도계를 사용하였고, Hansen은 모드 변수를 조사하기 위해 7개의 스트레인 게이지를 사용하였다.

- 최근에는 구조물의 동 특성을 분석하기 위해 광학 측정기기를 사용하는데, 이는 별도 전원 전선이 필요 없고 블레이드 내부에 데이터 전송 장치 등을 필요로 하지 않는 장점이 있다. Ozbek 등은 전통적인 스트레인 게이지와 레이저 간섭계 및 사진 측량계와 같은 광학 측정기기를 동시에 사용하여 측정하였다. 블레이드 및 타워에 반사 마크를 부착하고, 터빈의 정지 상태에서는 레이저 간섭계를 사용하고, 풍력터빈이 작동할 때는 사진 측량계를 사용하여 측정한다.

4. 평가 결과에 대한 분석

- 일반적으로 모든 해상풍력터빈에서는 측정된 결과를 풍력터빈 제어장치 또는 상태 감시 시스템에 제공한다. Smola 시험용 터빈에는 수많은 가속도계와 변형도 게이지를 설치하여 풍력터빈 구조물에 관한 보다 높은 지식을 확립하는 것이 목적이다.
- 최초의 시험용 수 MW 풍력터빈은 덴마크의 Tjaereborg 풍력터빈이다. 이 터빈은 로터 축 토크의 계산 결과와 80개의 센서를 사용하여 측정된 결과를 비교하여 공탄성 코드를 검증하는데 사용하였다. 빔 요소 모멘트(BEM, beam element momentum) 코드를 사용하여 공기역학적으로 시뮬레이션한 내용과 측정치를 비교한 결과 서로 잘 일치하였다.
- 2010년에 상업운전을 시작한 독일의 Alpha Ventus 풍력단지에는 12개의 5MW 풍력터빈으로 구성되어 있다. 6개는 3점 지지 구조물 위에 Areva 풍력터빈, 다른 6개는 재킷 기초 위에 RePower 풍력터빈을 설치하였다. 터빈, 기초 구조물, 송전탑 및 해저 기반에 1,200개의 센서를 설치하여 데이터를 수집하고, 그 중 4개의 터빈에는 기계적 응력과 부하, 전기적 특성 데이터, 운전 소음을 측정할 수 있는 센서를 장착하였다.
- 이 RAVE 계획에는 40개의 연구기관, 회사 및 기관이 34개의 개별 프로젝트로 참여하였다. 측정에 관해 몇 가지 코멘트를 하면, 측정 장치를 설치할 때 주의를 기울이고, 영점 보정이 되었는지 확인하여야 하고, 측정 활동 기간 동안 측정 데이터를 확실하게 획득할 수 있도록 안전장치가 준비되어 있어야 한다.

5. 결론

- 풍력터빈을 안전하고 신뢰성 있게 운전하고 시스템 수명을 연장하기 위해서는 풍력터빈의 모드 매개변수의 식별이 중요하다. 본 연구는 풍력터빈 구조물의 동 특성 시험에 필요한 최신 측정 기법에 대해 설명한다. 본 연구를 바탕으로 Statkraft가 운영할 Haugoya 시험용 터빈의 운영 계획을 수립하고, 풍력터빈의 규모가 커질 경우 더 높은 모드, 종방향 및 횡방향 타워의 첫 번째 모드에 관심을 집중하게 되었다.
- 적절한 동적 거동 데이터를 수집하기 위해 타워 또는 블레이드 등 구조 부품의 반응도 측정을 위한 데이터 샘플링률은 25Hz로 결정하고, 구동계통 부품의 진동은 kHz 수준의 더 높은 샘플링률을 얻을 수 있는 가속도계를 사용하였다. 타워와 나란하게 또 블레이드 루트 부 및 나셀에는 변형도 게이지와 가속도계의 사용을 추천한다.
- 블레이드의 상세한 모드분석을 하려면 광학 측정도구를 병행하여 사용하여야 한다. 풍력터빈의 모드 특성을 평가하기 위해 로터 정지 및 운전 모드 분석을 실시한다. 풍속은 광선 레이더(lidar)를 포함하여 음파 풍속계와 온도계가 구비된 기상학 마스트를 결합하여 측정한다. 광선 레이더는 정밀한 난류 측정에는 부적합하고 로터 회전면에 걸친 평균 풍속의 측정에 적합하다.
- 부하 측정 결과를 이용하여 터빈 부품의 잔여 수명을 계산할 수 있다. 위치 분할 측정 방법은 분산 정보를 제공하지 않는다. 모드 분석은 완전한 구조물의 시뮬레이션 분석에 신뢰성을 주고, 모드 형상과 상호 작용에 의해 동 특성과 피로 현상을 분석할 수 있다.

출처 : Lene Eliassen, Eivind Sæta, Jørgen Krokstad, "Measurement campaign of a large rotor wind turbine", *Energy Procedia*, 80, 2015, pp.159~167

◁ 전문가 제언 ▷

- 2015년 신 기후 체제 파리협정 이후, 세계 각국은 신재생에너지 발전에 투자를 늘리고 있다. 유럽은 2020년까지 온실가스 배출을 1990년 대비 20% 줄이기 위해 1차 에너지의 20%를 신재생에너지에서 획득하고, 에너지 수요의 20%를 절감하는 목표를 달성하기 위해 노력하고 있다. 2025년까지 풍력 에너지가 세계 전기 소비량의 약 10%를 차지할 것으로 예측되고, 이를 위해 대형 해상풍력 프로젝트가 추진되고 있다.
- 풍력 터빈 제조 기업들은 고품질의 믿을 수 있는 제품을 현지 시장과 고객의 요구에 따라 제공하고 풍력 터빈의 20년 설계 수명주기 전반에 걸쳐 목표한 비용과 품질을 달성하기 위해 노력하고 있다. 특히 베스트사는 가상으로 제조공정을 계획 및 검증함으로써 제조 비용 및 현장 문제를 최소화하고, 원하는 생산량을 확보할 수 있는 제조시스템과 공급망 프로세스 솔루션을 도입하였다.
- 본문에 수 MW 규모의 풍력터빈의 측정방법을 설계하는데 필요한 여러 도구를 제시하였다. 이 측정의 목적은 새로운 대형 풍력터빈 기술의 품질 수준을 정의하고, 풍력터빈 부품의 피로 수명을 평가하고, 시뮬레이션 도구를 검증하고자 하는 것이다. 풍력 터빈 구조물의 크기가 커짐에 따른 새로운 동 특성을 파악하고 설계 및 운전 리스크를 줄일 수 있다. 대형 풍력터빈의 동 특성에 대한 복잡한 측정방법과 측정기기 및 이론적 접근 방법에 대해 기술하였다.
- 본 연구는 풍력터빈 구조물의 동 특성 시험에 필요한 최신 측정기법으로 터빈의 운영계획을 수립한다. 풍력터빈의 규모가 커질 경우 더 높은 모드, 종 방향 및 횡 방향 타워의 첫 번째 모드에 관심을 집중하고, 부하 측정 결과를 이용하여 터빈 부품의 잔여 수명을 계산할 수 있다. 본 연구가 국내 대형 풍력터빈 제조사가 풍력터빈을 안전하고 신뢰성 있게 운전하고 시스템 수명을 연장하기 위해 복합적인 거동분석과 풍력 에너지에 대한 지속적인 기반 기술의 확보에 도움이 되기 기대한다.

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.