

풍력터빈에서 기어박스 베어링의 형상이 신뢰성에 미치는 영향

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

1. 서언

- 풍력에너지 연구의 주 관심 중 하나는 단순히 시스템 거동을 나타내는 다이내믹 모델에 기초를 두는 것이 아니고 확률적 정보를 포함한 모델에 근거한 시스템을 설계하는 것이다. 후자 접근방식에 의하면 바람의 조건, 재료 강도에 관한 사전 지식에 근거하여 부품의 기대 수명(또는 파괴 주파수)을 예측할 수 있다. 즉 풍력터빈 부품의 정비 비용을 최소화하기 위하여 신뢰성에 근거한 결정을 내리는 것이다.
- 해상풍력터빈 구동계의 내용 중에 부품 수명을 감소시켜 정지시간을 끝내는 반복적 파괴에 기인하여 유성기어 단에 있는 베어링을 연구하고 기어박스의 설계단계에서 다른 형상을 고려하는 것이 중요하다. 예를 들어 롤러 사이에 분포하는 다른 하중을 견디어 낼 수 있도록 서로 다른 형태의 베어링을 설계하여야 한다.
- 구동 계통을 전기-기계적 시뮬레이션 모델로 표시한 베어링 모델에 의해 베어링레이스 치수, 롤러 개수 및 롤러 접촉과 같은 베어링 강성 매트릭스 요소를 예측할 수 있다. 본문은 풍력터빈 구조모델이 외부 구동 계통과 상호작용하는 공동-시뮬레이션 접근방법을 포함하여 시뮬레이션 도구에 대해 설명한다.
- 그리고 원통 롤러 베어링(CRB, cylindrical roller bearing) 및 테이퍼 롤러 베어링(TRB, tapered roller bearing)과 같은 베어링 모델을 설명하고, 롤러 접촉각과 강성 매트릭스의 효과가 다른 기어박스 모델에 대해 설명한다. 다음에 베어링 수명과 풍력터빈 설계 표준인 IEC61400-1 Ed.3의 요구조건에 따라 신뢰성 분석을 수행하고, 마지막으로 두 개의

베어링 모델 사이에서 찾아낸 신뢰성의 차이로부터 결론을 도출한다.

2. 시뮬레이션 방법과 모델

- 풍력터빈 구조와 공기유동을 기술하기 위해 공탄성 코드(aeroelastic code) HAWC2(수평축 풍력터빈 시뮬레이션 2세대 코드)를 사용한다. 5MW NREL 터빈에 대해 시뮬레이션 인터페이스를 사용하여 HAWC2와 Matlab/Simulink를 연결하였다. 이 공동 시뮬레이션 인터페이스를 사용하여 각각 필요한 시간 단계에서 운동방정식을 풀어 낼 수 있다.
- 풍력터빈의 구조 동특성은 비교적 낮은 5Hz 영역에서 또 기어박스과 발전기는 높은 100Hz 구간에서 거동하고 있다. 이 두 개의 시스템은 주축의 비틀림 자유도에 의해 연결되어 있으므로 이 분석에서는 로터의 비토크(non-torque) 하중을 고려하지 않는다. 연결 블록 다이어그램에 의해 구동계의 입력 단에서의 기어박스에 적용되는 로터 비틀림 및 주축과 풍력터빈 타워 상단에서의 반력을 예측할 수 있다.
- Matlab의 평형 운동방정식의 작은 변화도 풍력터빈 구조에 영향을 미치고, 이 시스템은 발전기의 토크가 기어박스과 풍력터빈 구조에 영향을 미친다. 구동계통은 3단 기어박스로 구성되어 있는데 저속 단은 유성기어이고, 중속 및 고속 단은 평행기어로 되어 있다.
- 유성기어 좌표계에서 기어-휠은 강체이고, 기어 치의 유연성에 기인한 상호작용은 기어 쌍의 기어 메시 강성을 의미하는 선형 스프링으로 묘사된다. 이와 같이 베어링은 선형 스프링으로 모델링하고, 기어 박스의 유성기어, 선 기어 및 피니언기어에 대한 유연 지지구조로 작용한다. 입력과 출력 기어 휠 사이의 비틀림 스프링에 의해 각 단을 연결한다.
- 발전기 관성은 HSS의 피니언과 비틀림에 의해 연결되고, 기계적 모델의 운동방정식은 정상 공간 모델로 정렬되어 있어, Matlab/Simulink의 표준 ODE를 사용한 수치적분법에 의해 해법을 구할 수 있다. 여기에 적용한 발전기는 영구자석 동기발전기(PMSG)이고, Simulink를 사용하며 입력은 발전기 관성 속도이고, 출력은 전자기 토크이다. 이 전자기 토크는 기어박스의 입력이 되고, 기계제어기는 풍력터빈 제어장치에 의

해 계산된 토크 요구량을 참고로 하여 발전기 토크를 보상한다.

- 베어링은 보통 반경 방향의 선형 강성으로 나타낸다. 이 표현방법은 시스템 동특성의 모드해석과 로터 시스템의 가로 진동의 연구에 유용하게 사용된다. Hertzian 접촉이론에 따르면 이 모델은 베어링의 기하학적 형상, 접촉 변형, 베어링 무게중심의 축 방향 및 반경방향 변형의 함수이다. 주요 목적은 서로 다른 조건 하에서 베어링 하중에 주는 충격을 연구하는 것이다.

3. 시뮬레이션 결과

- 전체 풍력터빈 시스템에 대해 공통 시뮬레이션 방식을 사용하여 두 종류의 시뮬레이션을 수행하였다. 각각은 서로 다른 베어링 형상의 다른 베어링 강성에 대한 시뮬레이션이고, 5m/s에서 25m/s까지 2m/s씩 증가하면서 평균 풍속에서 NTM을 사용하여 총 6개 임의의 교란 시뮬레이션을 수행하였다.
- 난류 기류에 의해 발생하는 비틀림 하중의 변동에 따른 베어링 피로손상을 계산하기 위해 시계열 분석을 실시하였다. 또한 기어 메시 영향력이 베어링 반응에 영향을 고려하여 베어링 반경방향 하중에 기인하는 손상 증가 하중을 계산하였다.
- 정격 속도에 도달하기 전에는 두 가지 분석에서 별로 큰 차이를 보이지 않았지만, 9m/s 및 11m/s의 정격 속도와 그 이상의 정격 속도에서는 두 종류의 손상증가하중이 TRB와 같은 정도로 증가하였다. IEC61400-4 표준에 보면 저속 유성기어 단에서 베어링 정격 수명은 20년 설계 수명에서 10^5 시간이라고 추천하고 있다.
- 신뢰성 분석의 주요 목적은 구조물이 하중에 의해 파괴될 확률을 찾아내는 것이다. 신뢰성을 계산하려면 서로 다른 불확실성에 따른 구조물의 저항을 규명할 필요가 있다. 베어링이 20년을 견디기 위해 10^5 시간 사용 조건으로 하고 신뢰성 지수와 파괴 확률을 계산하였다.
- 동등한 동적 정격에 대해 신뢰성 분석을 한 결과 CRB형상이 TRB보다

더 신뢰성이 높은 것으로 나타났다. 동적 정격, 손상 증가하중 및 베어링 강성 사이에 관련성이 있는 것으로 나타났다. TRB의 경우 모든 풍속 영역에 걸쳐서 손상 증가하중이 높을지라도 동적 정격이 약 5% 정도 높은 것을 감안하면 CRB보다 더 신뢰성이 있다고 판단된다.

4. 결론

- 본문에 풍력터빈의 경우 유성기어 박스의 예비설계 단계에서 베어링을 선택하는데 사용할 수 있는 방법을 제시하였다. 먼저 두 가지 도구 사이에 동력학적 연결을 위한 접근방법을 확장하여 집중 변수에 기반을 둔 기어박스 모델을 완성하였다. 이 연결 분석 방법을 사용하면 풍력터빈의 전기기계 부품과 구조 부품의 시스템 시뮬레이션을 완벽하게 수행할 수 있다.
- 이 방법은 서로 다른 기어박스와 발전기를 정의하고 HF FEM 방법에 비해 빠르기 때문에 이 방식의 모델은 초기 설계 단계에서 부가 정보를 얻을 수 있고, 베어링의 피로 분석을 수행하기 위해 정상적인 전력 생산에 대한 시뮬레이션을 수행할 수 있다. 그 결과에 의하면 베어링의 피로 차이에 따라 더 높은 강성에 기인한 풍속 범위에 걸쳐 TRB에 더 많은 손상이 누적된다.
- 그러나 이 두 모델 사이에 동적 베어링 용량의 심각한 영향에 기인한 신뢰성 관점에서 큰 차이는 없었다. 본문은 시뮬레이션 도구의 가능한 용량과 베어링 신뢰성 관점에서 예상되는 결과를 보였으며, 향후에는 풍력터빈에서 전단 및 굽힘 모멘트와 같은 비토크 하중에 의해 생성되는 축 하중을 포함한 분석이 이루어지기 기대한다.

출처 : Juan Gallego-Calderon, Anand Natarajan, Nikolay K. Dimitrov, "Effects of bearing configuration in wind turbine gearbox reliability", *Energy Procedia*, 80, 2015, pp.392~400

◁ 전문가 제언 ▷

- 풍력에너지는 친환경적, 반영구적이며 점차 에너지 생산 비용이 낮아지고 있어 현재 세계적으로 각광받는 에너지원이다. 풍력발전기의 기어박스는 정상적인 에너지 생산을 위해 필수적이지만 빈번한 고장으로 인해 풍력발전기의 설비가동률을 낮추는 주요 요인이 된다. 기어박스의 고장에 대해 비토크 하중의 영향이 가장 큰 관심의 대상이 되고 있다.
- 본문은 여러 가지 형태의 유성기어 베어링의 신뢰성에 미치는 영향을 검토하였다. 풍력터빈 기어박스의 저속 유성기어 단계에 위치하고 있는 원통형 및 테이퍼 롤러 베어링의 강성 매트릭스는 기전 구동 계통 시뮬레이션에 포함된다. Matlab/Simulink에 정의된 시스템은 공탄성 소프트웨어에 정의된 풍력터빈과 함께 시뮬레이션을 수행하였다.
- 메인 베어링은 강성이 증가함에 따라 기어박스 입력축의 변위가 증가하고 입력하중의 크기는 감소하며, 굽힘 모멘트에 대한 강성이 기어박스의 입력하중에 큰 영향을 미친다. 즉 메인 베어링의 강성이 클수록 기어박스의 수명은 유리하나, 메인 베어링의 사이즈 및 가격을 상승시키고, 내력을 증가시켜 축과 메인 베어링의 파손을 유발시킬 수 있다.
- 현재 풍력 부품의 국산화율은 가격을 기준으로 70% 수준이다. 부품수로 보면 70%에 미치지 못한다. 블레이드는 일찍이 국산화됐지만 풍력의 회전속도를 높이는 기어박스는 아직 국산화되지 않았으며, 영구자석형 발전기와 풍력터빈 제어기술은 확보됐다. 베어링의 경우 요-피치 베어링은 국산화됐으나 주축 베어링 기술은 아직 확보되지 않았다.
- 해상풍력의 발전을 위해 국내 풍력발전 기업들도 풍력터빈의 모든 부품에 관해 대표적인 구조 및 결함을 자세하게 검토하여, 바람의 조건, 재료 강도에 관한 사전 지식을 근거로 부품의 기대수명을 예측할 수 있어야 한다. 특히 아직 국산화가 이루어지지 않은 유성기어 단에 있는 베어링의 경우 전단 및 굽힘 모멘트와 같은 비토크 하중에 의해 생성되는 축 하중을 포함한 분석이 이루어지기 기대한다.

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.