

풍력터빈의 수명예측과 고급 제어전략을 위한 구조물 상태 감시 방법

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

1. 머리말

- 구조물 상태 감시(SHM: Structural Health Monitoring) 과정은 통계적 패턴인식 문제를 나타내며 SHM 과제는 네 가지 연속적 단계를 거쳐 해결될 수 있다. 첫 단계는 SHM을 위한 데이터 획득 제한, 작업과 환경 조건 및 시스템 실패 기준의 적합한 기술적 인식과 경제적 정당성 인식의 확립이다. 둘째 단계는 센서의 선택, 센서의 수와 위치뿐만 아니라 하드웨어/소프트웨어 모듈들이 배치되어야 한다. 필요하다면 다른 센서로부터의 데이터가 융합되고 사전처리(필터링, 정상화 등) 되어야 한다.
- 셋째 단계는 융합된 신호에서 특징들이 추출/선택되어야 한다. 마지막 넷째 단계는 특징 변화의 통계적 지표를 계산하기 위해 추정하는 통계적 모델이 확립되어야 한다. 본문은 풍력터빈 블레이드와 기어박스/베어링에 대한 SHM 방법론과 손상 메커니즘의 통합을 강조하고 손상 성장 감소에 대해 논의했다.

2. 변동 하중을 위한 설계

- 풍력터빈 유입 조건
 - 풍속, 풍향 및 전단 같은 공기역학적 하중과 지진 하중뿐만 아니라 얼음, 눈, 습도, 공기 밀도 및 열적 하중이 해상과 육상풍력터빈 시스템의 구조적 하중에 반영된다.
 - 공기역학적 하중 외에 해상풍력 시스템에서 환경적 하중은 유체역학적 하중(표면 파도와 해류)을 포함하여 더 복잡하다. 공기역학적 하

중을 넘어 표면 과도와 해양 조류에 의한 유체역학적 하중의 고려가 풍력터빈의 성능에 강하게 영향을 주므로 피로분석이 요구된다.

○ 풍력터빈 피로 성장과 모델링에 대한 유입 조건의 영향

- 공기역학과 유체역학적 하중은 타워 앞뒤와 좌우의 변형, 블레이드의 판 쪽과 모서리 쪽 굽힘 모멘트뿐만 아니라 구동렬의 비틀림 토크 측정을 사용하여 정량화된 피로 하중이 상당히 크게 되는 점에서 시스템 오류로 이어지는 피로 손상을 야기한다.
- 게다가 구조물에 발생한 누적된 손상/손상물이나 피로에 관련된 특수한 유동 조건이 구조물 하중 감소에 필수적이다. 발생 전력, 피치 각, 발전기 속도도 이들 파라미터가 구조적 하중에 의해 영향을 받으므로 피로하중 분석을 위해 사용될 수 있다.

3. 구조물 상태 관리

○ 블레이드의 구조적 감시-센싱 기술

- 블레이드의 전형적인 실패 모드는 크랙, 섬유 파손, 섬유 잡아 뺨/수지 부족, 박리, 탈 접착이다. 풍력터빈 블레이드에 관한 음향 방출, 초음파, 진동, 적외선 또는 열 신호 뿐 아니라 변형률 감시, 육안 검사, 방사선 및 와전류 시험이 손상 과정에 상호 연결시키기 위하여 표적에 적용된다. 음향 방출과 변형률 감시기술은 온라인 실시 가능성이 높다.
- 음향 방출 측정: 재료 내의 저 진폭 범위와 고주파 대역폭(100kHz~1MHz)의 탄성과 방출은 음향 방출(AE: Acoustic Emission)로 알려져 있다. AE파는 에너지 방출의 결과로 변형을 받는 재료 내에 발생한다. 그러므로 AE 기술은 검사되는 목적물에 의해 방출되는 탄성파의 출처 때문에 수동적 비파괴(NDT: nondestructive technique) 기술이다. AE 탄성파는 SHM에서 흔히 감시되는 신호이다.
- 유도전파를 사용한 구조 감시: 유도전파는 구조물 경계에 의해 안내되는 구조물을 따라 전파하는 초음파 탄성파이다. 최근 유도전파는

손상 위치, 종류 뿐 아니라 손상의 심각성을 탐지하기 위하여 사용된다. 능동 NDT 기술로 적당한 변환기를 사용한 구조물의 여기가 필요하다.

- 변형률 측정: 재료의 탄성변형 뿐 아니라 적용된 압축이나 인장응력으로 인한 길이 변화는 변형률이 응력에 비례하므로 정량적으로 결정될 수 있다. 적당한 센서 위치를 위해 최대 견딜 수 있는 변형률 수준과 블레이드 핫 스팟(블레이드의 루트, 블레이드 접착/용접 연결 조인트)이 예상 변형률과 실패/손상 탐색과 가능한 실패 전파/예측을 하기 위하여 미리 알려져 있어야 한다.

○ 기어박스과 베어링의 구조적 감시-센싱 기술

- 진동 측정: 감시를 위한 센서의 종류(레이저 진동기, 속도센서, 가속도계, 파장 방출에너지 센서, 변위센서)는 관심 있는 주파수 대역폭에 따른다. 기어박스과 베어링에서 구조적 변화는 변경된 자연 진동수/모드형상에 반영되고 이것이 실패나 손상에 관한 정보를 추출하기 위해 사용된다.
- 음향 방출 측정: 진동 센서는 구조물의 이동(속도, 가속도등)을 탐색할 수 있는 반면, 음향방출 센서는 구조물을 건너 전파하는 탄성파를 직접 포착할 수 있다. 풍력터빈의 저 회전 속도에서는 진동감시기술이 초기 시작 과정에서는 기어박스/베어링의 실패 검출에 불만족스러운 결과를 보였다. 반대로 음향방출 측정은 초기 단계에서 피팅과 크랙 같은 기어박스/베어링의 실패를 탐색할 수 있다. AE 신호에 근거한 다양한 통계적 변수가 계산될 수 있고 결함검출에 이용된다.
- 오일 분석: 마모 입자와 오일 온도가 기어박스과 베어링의 건강 상태를 위한 지표로 사용될 수 있다. 이 기술은 건강 상태를 직접 결정할 수 있다.

4. 실패 탐색과 분류를 위한 신호 기반 방법

○ 시간과 주파수 영역 분석

- 시간 영역에서 통계적 분석의 주 목적은 고려된 구조물에서 발생한 변화들에 관련될 수 있는 신호를 추출하는 것이다. 통계적 방법으로 시간 영역 신호분석은 신호/구조물에서 변화를 나타낼 수 있는 통계적 변수들의 계산이 필요하다.
- 만약 시간 영역 신호분석이 AE 신호의 예에 대한 모달 분석에 관해서 논의된다면 침투 진폭, 도착 시간, 상승 시간, 회수 또는 지속 시간 비율이 계산될 수 있으며 확인과 분류 목적으로 사용될 수 있다.

○ 시간 주파수 영역분석

- 구조물이나 회전기계에서 발생하는 변화는 측정된 신호의 주파수 성분의 변화에 반영되어서 실패 발생과 전파를 대표할 수 있다. 그래서 시간 주파수 영역 신호분석은 실패 탐색과 분류를 위한 도구이다. 시간 주파수 영역 신호분석은 신호변환에 관심이 있는 반면, 주파수 영역이 나타나는 주파수 내용과 관련 기간이 결합된다.
- 시간 주파수 내용 분석을 목적으로 단시간 주파수 변환(STFT), 이산 웨이브릿 변환(DET), 연속 웨이브릿 변환(CWT), Wagner-Ville 분포(WVD)가 사용된다. 이 방법은 베어링, 기어박스, 로터 블레이드 및 나셀의 변화 탐색에 널리 사용된다.

5. 안전과 신뢰성 제어 공학 개념

- 안전과 신뢰성 제어 엔지니어링 개념(SRCE: Safety and Reliability Control Engineering Concept)은 잔여 수명을 예측하기 위하여 현재 건강 상태에 관한 지식을 사용하는 아이디어이고, 현재 건강 상태에 제어전략을 조정하기 위하여 목표로 하는 제어루프로 관련정보를 통합한다. 대부분의 기술적 시스템은 제조자가 시스템이 미리 규정된 작동 조건 아래 사용되면 얻을 수 있는 미리 규정된 서비스 수명을 준다.
- 이에 반하여 시스템은 시간에 걸쳐 계획되지 않은 시스템변화의 존재 때문에 미리 규정된 방식대로 사용되었다고 결합 발생과 시스템 노화가 나타난다. 이는 미리 규정된 수명이 변화될 수 있는 것을 의미한다.

다. 수명 단축을 피하고 시스템 수명을 연장하기 위해서 제어전략이 현재 건강 상태를 조정할 수 있다.

- SRCE 개념에서 신뢰성은 하중-응력 의존으로 정의되어 다른 하중 프로필이 시스템 신뢰성에 다른 영향을 준다. 더구나 시스템 신뢰도는 시간에만 의존하지 않고 사용의 특성에도 의존한다.
- 안전과 신뢰도 제어 엔지니어링 개념은 여기서 세 개의 단위/모듈 개념으로 논의되고 그들 각각은 주의 깊게 정의된 과제들을 떠맡는다. SRCE 개념 실시에서 1차 수준은 관련 시스템 파라미터에 관해서 시스템을 감시한다. 측정치를 포착하고 저장한 후 데이터가 변화를 발견할 목표로 처리된다. 결함을 나타내는 이들 변화는 2차 수준에 관여한다.
- 결함의 발생과 관련된 진단은 신뢰성의 상실과 손상 증가로 나타나기 때문에 시스템 신뢰성에 상당한 영향을 준다. 측정된 시스템 파라미터와 건강 상태 뿐 아니라 시스템 수명의 예측 간의 상관관계는 SRCE 개념의 핵심 단위이다. 이 목적을 위하여 수명 모델이 필요하다.
- 현재와 추측하거나 예측한 작동 상태에 관한 지식에 근거하여 측정된 시스템 변수들 그리고 적당히 확인된 수명모델, 남은 수명이 계산될 수 있거나 추정될 수 있다. 이 경우 실패 기준이 미리 알려져야 한다. 물론 이 손상 고려는 중요한 부품을 위하여 시행되어야 한다.

6. 맺음말

- 센서 기술과 해당 신호처리법에 관련된 구조물 상태 감시의 최근 지식이 수정되었고 풍력터빈시스템 부품들에 적용되는 SHM 전략에 집중했다. 또한 시스템의 수명에 영향을 주는 하중 프로필의 검사에 주력했다. 지난 3년에 걸친 풍력터빈시스템의 결함 탐색과 진단법 분야의 과학적 발전이 지적되었고 자세히 논의되었다.
- 풍력터빈시스템 SHM의 현존 개요가 새로 개발된 기술과 추가 개발의 경향의 강조 내에서 주어졌다. 시스템 신뢰성과 예측에 대한 영향 때문에 피로하중 분석이 초점이다. SHM의 진전은 더 정확한 상태 감시 센

싱 기술뿐만 아니라 개선된 데이터 처리 접근법도 현저하다. 또한 고급 기능의 추출/분류법과 개선된 수명 모델링 기술이 언급되었다.

- 풍력터빈시스템에 관한 SHM에서 앞으로 중요한 단계는 수명 예측 분야, 현재 시스템 상태에 대한 운영 조건의 적당한 선택 및 예상되는 남은 수명(희망 수명에 비교한)이다. 풍력터빈의 미리 계획된 서비스 수명은 현재의 건강 상태를 고려한 가능한 제어전략의 적용에 의해서 달성될 수 있다.
- 아직 해결되지 않은 문제는 고려된 특정 결함에 관계된 특정 과제에 적절한 센서 배치, 센서의 종류, 위치 및 개수에 의하여 정의된다. 풍력터빈은 일반적으로 응용 분야에서 풍력단지에 설치된다고 추정하므로 미래 작업도 전체 풍력단지 감시의 분석(개별 풍력터빈뿐만 아니라) 및 운영과 보수비를 줄이기 위한 여러 구성요소의 동시 보수/교체를 지향할 수 있다.
- 이것은 단지의 일반적 수리와 보수 활동이 최적화될 수 있도록 개별 시스템의 신뢰성과 보수 지향의 제어를 포함한다. 진단과 예측모델에 관한 적당한 지식을 사용할 수 있으면 전력생산의 유용성이 극대화되도록 시스템을 제어할 대체 전략도 실현될 수 있다.

출처 : Nejra Beganovic, Dirk Söffker, “Structural health management utilization for lifetime prognosis and advanced control strategy deployment of wind turbines: An overview and outlook concerning actual methods, tools, and obtained results”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 2016, pp.68-83

◁ 전문가 제언 ▷

- 본문은 풍력터빈 시스템에 적용하는 구조물 상태 감시(SHM: Structural Health Monitoring) 시스템에 관해 기술하였다. 대형 풍력터빈에 현저한 구조적 하중이 풍력터빈의 하위시스템에 영향을 주는 손상 누적으로 야기된 영향들 때문에 수명 단축의 원인이 된다. 건강 상태에 관한 풍력터빈 시스템의 지속적인 감시가 신뢰성 있고 효율적인 운영뿐만 아니라 효율적인 에너지 추출을 보장한다.
- 최근에 풍력터빈시스템의 구조물 상태 관리가 자동화된 온라인 고장 검출과 상태 감시(CM: Condition Monitoring)시스템 통합을 통해 상당히 개선되었다. 하드웨어 부품(주로 센서기술)과 변화평가에 사용된 방법, 손상 검출 및 손상 누적 추정이 주어졌다. 해상풍력터빈 시스템에 주안점을 둔 구조적 하중을 다루는 방법과 접근법에 관한 최근 지식과 적용된 센싱기술(특히 풍력터빈 블레이드, 기어박스 및 베어링)이 강조되었다.
- 해상풍력터빈의 더 광범위한 설치의 장애 중의 하나는 해상풍력 운영과 보수비가 육상 기반 비용의 2배 이상 높은 것이다. 이 비용을 낮출 수 있는 한 가지 방법은 스마트한 하중관리로 상태기반 보수의 일부로 구조적 건강 및 예측 관리 시스템을 사용하는 것이다.
- KAIST의 손 훈 등은 펄스 레이저 도플러 진동계를 블레이드 표면에서 저밀도로 스캐닝하여 초음파 정보를 획득하고 이를 해석하여 손상이 존재하는 영역을 추정하였다. 추정된 손상 영역에 대해 고밀도 스캐닝을 수행하여 손상 위치를 파악할 수 있었다. 이를 위하여 비접촉식 초음파 생성/측정기술을 개발하고, 측정정보에 대한 신호처리를 거쳐 손상을 자동으로 감지하고 그 위치를 파악하는 기법을 개발하였다.
- 최근 우리나라도 제주도 남쪽 해안에 3MW 해상풍력 10기 중 3기를 설치하였다. 미국과 EU처럼 SHM 기술에 대한 R&D를 수행하여 해상풍력터빈의 수명 연장과 비용 절감을 도모하여 전남 부안군 서해상의 2.5GW 발전단지를 성공적으로 수행해야 한다.

이 분석물은 미래창조과학부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.