

풍력발전기를 위한 상태 모니터링 기술

자파르 하미드¹⁾, 홍 영선¹⁾, 안 성훈¹⁾*, 조 영만¹⁾, 송 철기²⁾, 박 종포³⁾

Condition Monitoring System of Wind Turbine

Z. Hameed, Y.S. Hong, S.H. Ahn, Y.M. Cho, C.K. Song

Key words : 상태 모니터링시스템(Condition Monitoring System, CMS), 온도 변형률 센서(Distributed temperature and Strain Sensor, DTSS), 광섬유(Fiber-optic, FO), 브래그 격자(Fiber Bragg grating, FBG), 음향 방출 (Acoustic Emission, AE), 지르콘산염 (Lead zirconate titanate, PZT)

Abstract : Renewable energy sources such as wind energy is copiously available without any limitation. Wind turbines are used to tap the potential of wind energy which is available in millions of megawatt. Reliability of wind turbine is critical to extract this maximum amount of energy from the wind. We reviewed different techniques, methodologies, and algorithms developed to monitor the performance of wind turbine as well as for an early fault detection to keep away the wind turbines from catastrophic conditions due to sudden breakdowns. To keep the wind turbine in operation, implementation of Condition Monitoring System (CMS) is paramount, and for this purpose ample knowledge of these types of system is mandatory. So, an attempt has been made in this direction to review maximum approaches related to CMS in this piece of writing.

1. 서 론

풍력발전기는 바람의 운동 에너지를 발전기를 통해 전기 에너지로 변환하는 장치로서, 청정에너지에 대한 요구의 증가와, 터빈의 에너지 발전 효율의 향상으로 인해 그 중요성과 수요가 날로 커지고 있다. 풍력발전기술은 1980년 이후, 항공역학, 구조역학, 기상학의 발달과 함께 매년 에너지 효율이 증가하고 있으며, 터빈의 중량과 발생되는 소음은 감소되고 있다.

풍력발전의 효율을 높이기 위한 여러 가지 기술 중에서 상태 모니터링을 이용해서 기기의 이상을 초기에 감지하여 적절한 사고예방을 통한 풍력발전기의 내구성을 높이는 것이 중요한 기술로 여겨지고 있다. 그래서 본 연구에서는 풍력발전기의 이상을 감지할 수 있는 상태모니터링(Condition Monitoring System, CMS)기술의 적용 현황과 다양한 모니터링 기술을 통한 풍력발전기의 이상을 감지하는 연구에 대한 조사를 수행하였다.¹⁾

본 논문에서는 상태모니터링 기술의 필요성에 대해 나타내었고, CMS 기술에 필요한 기본적인

기술과 발전된 CMS를 위해 개발되어야 할 선행기술을 나누어 알아보았다. 마지막으로 전체 시스템 및 하위 시스템별로 이루어지고 있는 모니터링 방법에 대해 언급하고 있다.

2. 상태 모니터링 시스템 방법론

상태 모니터링 기술은 시스템 부품의 상태를 알려주는 방법으로 예전부터 산업계에서 사용되던 기술이었지만 풍력발전에는 근래에 들어 적용되고 있다. 풍력발전기의 회전을 담당하는 베어링, 기어와 같은 부품들은 바람이라는 에너지원의 특성상 불규칙하고 파손을 일으킬만한 수준의 하중을 받는다. 또한 그러한 하중들로 인한 부품의 손상은 시스템 전체의 심각한 파손으로 이어지는 것이 대부분이다. 이러한 파손은 피할 수

- 1) 서울대학교 기계항공공학부, 정밀기계설계공동연구소
E-mail : ahnsh@snu.ac.kr
Tel : (02)880-7110 Fax : (02)883-0179
- 2) 경상대학교 기계항공공학부
E-mail : cksong@gsnu.ac.kr
Tel : (055)751-6074 Fax : (055)762-0227
- 3) 두산 중공업 기술연구원
E-mail : jongpo.park@doosan.com
Tel : (042)712-2104 Fax : (042)712-2299

없는 것이지만 초기에 이상을 감지해서 적절한 조치를 취한다면 시스템 전체의 갑작스런 파손을 효과적으로 예방할 수 있다. CMS를 통한 시스템의 이상 진단은 표.1과 같은 특징을 지닌다.²⁾

CMS는 크게 센서의 특징 및 신뢰성에 따라 부품의 파손이 두드러지게 나타날 수 있는 지점에 위치시켜 시스템의 이상을 감지하도록 하는 센서 기술과 시스템의 각 부품들이 파손되는 임계한도를 정하고 이를 통해 실제 운행 시 어떤 부품이 시스템의 파손을 야기할 것인지를 파악하는 상태 진단 기술로 나눌 수 있다.³⁾

Table 1 상태 모니터링 시스템의 특징²⁾

특징	장점	시스템에 미치는 효과
초기 진단	- 고장 및 파손 방지 - 합리적인 유지 보수 설계 가능	- 수리비용 절감 - 고장으로 인한 정지기간의 최소화
문제 발생 확인	- 정확한 시기에 적절한 조치가 가능 - 불필요한 수리의 최소화 - 조기에측을 통해 제품의보장기간 동안의 문제 해결 가능	- 제품의 수명 연장 - 유지비용의 최소화 - 운행기간 동안 전력공급 및 운행의 질 보장
상태 모니터링	- 운행 중인 풍력 발전기 상황의 주기적이고 정확한 파악	- 풍력발전기의 안전성에 대한 신뢰

2.1 CMS기술의 기본 기술들

풍력발전기 혹은 구성부품에 사용되는 CMS기본기술은 아래와 같이 요약될 수 있다.^{4,5)}

1) 진동 분석

상태 진단의 대표적인 기술로 특히 기어박스, 베어링, 휠과 같은 회전체의 이상측정에 적용되고 있고, 사용되는 센서는 주파수영역에 따라 아래와 같이 분류된다.

- ① 저 주파수대역 : 변위 센서
- ② 중간주파수대역 : 속도계
- ③ 고 주파수대역 : 가속도계
- ④ 초단파대역 : SEE (Spectral Emitted Energy) 센서

이러한 센서를 통한 신호를 통해 시스템의 이상을 감지할 수 있고, 풍력발전의 경우 다른 시스템과 달리 긴 예상 수명으로 인해 오랜 시간 하중이 작용하고 운행 속도가 느리다는 특징을 갖는다. 또한 모니터링 투자비용을 유지보수의 비용절감으로 대체한다는 특징을 가진다.

2) 오일 분석

오일 분석은 아래와 같은 두 가지 목적을 위해 사용된다.

- ① 오일의 성질 보호
- ② 부품의 점착 보호

센서의 가격의 하락으로 인해 오일의 성질을

온라인상으로 진단하는 센서의 사용이 일반화 되었고 이러한 센서를 통해 과도한 오일 및 필터의 오염, 부품의 특성 변화를 감지하는 기술이 점차 널리 사용되고 있는 실정이다.

3) 열점(Thermography) 검사

전기부품의 이상을 감지하는 것으로 부품의 변질 혹은 부품간의 접촉 불량으로 인해 발생된 열점을 검사하는 방법이다.

4) 재료의 물리적 특성 검사

재료의 크랙의 발견이나 크랙의 성장을 진단하는데 초점을 맞춘 검사방법으로 온라인상의 검사는 거의 없는 편이지만 광학 퓨즈를 통한 날개의 검사나 음향진단이 이러한 검사에 해당한다.

5) 스트레인 측정

스트레인 게이지를 이용한 진단법은 산업계에 서 일반적으로 사용되는 방법이지만, 풍력발전과 같은 오랜 운행시간을 갖는 시스템에는 적합하지 않다. 하지만 날개와 같은 시스템에 사용되는 부품의 수명예측에 있어서는 유용하게 사용되고 있다.

6) 음향 모니터링

음향 모니터링은 진동 모니터링과 깊은 관계가 있는 것으로 진동 측정은 풍력발전의 구조상 다른 부분의 진동신호의 유입을 차단할 수 없지만 상대적으로 음향신호는 기어박스나 베어링과 같은 원하는 측정 부위에 위치시켜서 측정을 할 수 있다는 장점이 있다. 음향 모니터링은 운행상태를 측정하는 수동적인 방법과, 직접 가진하여 응답을 측정하는 능동적인 방법이 있다.

7) 파라미터 선정

풍력발전의 이상 진단기술은 점차 정교해지고 발달하고 있지만 기본적으로 평균적인 운행 신호 상태와 정해진 위험 범위에서 실제 운행 중인 신호의 비교를 통해 이상을 판단하는 수준에서 머물러 있어서 시스템의 이상을 가장 극명하게 드러내주는 파라미터의 선정, 추출 및 그에 따른 평가가 중요하다.

8) 운행 평가

풍력발전기의 운행평가는 단순히 초기의 성능을 위주로 평가되는 것이 일반적이지만 오래 사용될수록 전체적인 성능 저하를 감안해서 출력, 풍속, 로터 속도, 및 날개각 등의 요소들 간의 관계에서 이상 범위를 적절하게 증가시키는 것이 잘못된 이상진단을 예방하는 것이다.

2.2 CMS구현을 위한 선행기술

풍력발전기에 성공적인 이상 진단 기술의 적용에 있어서 아래와 같은 항목들의 기술들의 발전이 선행되어야 한다.⁵⁾

1) 보호기능의 개발

풍력발전기의 보호 기능은 저렴한 가격, 향상된 인지능력을 통해 초기이상 진단의 기능이 더

향상되어야 한다.

2) 해석 방법 및 기술 개발

풍력터빈의 주요인자인 출력, 피치 (pitch) 각, 회전속도, 풍속, 요 (yaw) 각도 등은 터빈의 운행 전반에 대한 시야를 준다. 이러한 인자들을 통해 더 나아가 어떤 문제 때문에 지금의 이상이 발생했는가를 판단할 수 있을 정도의 해석 기술의 발전이 필요하다.

3) 현재의 제품과의 연계성

분리된 단품에 대한 해석을 통해 전체시스템의 수명이나 이상 범위를 정하는 일반적인 기계시스템과는 달리 풍력발전의 경우 모니터링 되는 기계의 부품수가 많고, 각 부품들의 이상상태 오차 범위도 작은 편이다. 따라서 현재 사용되는 풍력 발전기에 모니터링 기술을 적용함에 있어서는 단순한 단품에 대한 하중상태뿐 아니라 시스템 전체에 대한 합리적이고 통합적인 접근이 필요하다.

4) 상태 정보 전달

대부분의 대규모 풍력발전기의 경우 각각의 발전기는 중앙제어실에서 관리된다. 각 발전기의 정보는 중앙제어실에 보고되기 전에 각 풍력발전기에서 처리되고 필터링을 통해 유용하고 핵심적인 정보만이 중앙처리장치로 전달된다. 하지만 이러한 모니터링 기술이 효과적으로 사용되기 위해서는 아래와 같은 2가지 사항에 유의해야 한다.

- ① 장시간에 걸친 안전한 감지기능
 - 모니터링 기술들이 풍력발전기모니터링에 적용된 기술들이 발전기의 긴 예상 수명동안 효과적으로 작동하는지에 대한 평가가 필요하다.
- ② 중앙장치의 통제 능력
 - 모니터링 시스템의 오작동으로 인한 직접적인 터빈운행의 정지와 같은 사고를 예방하기 위해 운행결정은 모니터링 시스템이 아니라 중앙제어시스템이나 운영자가 직접 해야 한다.

3. 알고리즘

풍력발전기의 이상진단을 위해 적용된 모니터링 기술들은 부품의 초기상태의 크랙, 마모 등과 같은 이상을 파악할 수 있게 해준다. 일반적으로 풍력발전기의 모니터링 알고리즘은 파손이 빈번한 베어링 같은 회전부품들과 회전부품들을 직접 지지해주는 부분에 초점이 맞춰져 있지만 각 풍력발전기의 실제운영환경, 설치위치에 따라 중요한 파라미터들이 다를 수 있기 때문에 CMS의 효과적인 적용은 적합한 파라미터의 선정에 의해 결정된다고 볼 수 있다. 풍력발전기의 상태를 잘 나타내는 중요파라미터들은 설계, 발전, 생산 및 제조 회사마다 우선순위에 차이가 있다.⁵⁾ 따라서 적절한 중요파라미터의 선정과 센서를 통한 모니터링은 CMS에서 매우 중요한 부분이다.

3.1 전체시스템을 통한 상태 모니터링

풍력발전의 모니터링 기술은 일반적으로 하위

시스템인 기어박스, 피치와 같은 부분에서 얻어진 신호를 통해 현재의 상태를 진단한다. 대체로 이러한 기술들은 미리 정해진 이상상태 오차범위를 넘어서면 고장으로 판단하는 알고리즘으로 대표되는 신호, 혹은 여러 개의 신호에서 중요한 정보의 추출을 통해 초기에 각부품의 이상을 진단하지만 전체 시스템의 경우는 시스템 자체가 훨씬 복잡하고 부품간의 연결이 명확하게 정의되어야 하기 때문에 이 분야에 대한 진단 방법은 아직 많은 연구가 필요한 부분이다.⁵⁾

3.1.1 출력을 통한 시스템 모니터링⁶⁾

풍력발전기를 통해 출력되는 에너지와 블레이드의 속도와 같이 전체 시스템의 출력과 관계된 파라미터들의 모니터링을 통해 이상상태를 파악하는 것으로 각 부품의 이상을 점검하는 것이 아니라 전체 시스템의 운영상태를 파악하는 기술이다.

3.1.2 온라인상에서의 오염도 측정 모니터링⁷⁾

온라인상으로 유체의 오염을 모니터링 하는 기술로, 유체에 자장을 걸어서 그 속에 포함되어 있는 강자성체의 양을 측정하여 그것으로 접촉되는 부품의 마모가 얼마나 진행되었는지 유추하는 방법, 레이저를 통해 유체내의 불순물의 사이즈와 양을 측정하여 판단하는 방법과 유체에 가는 망을 통과시켜서 유체가 저항하는 압력을 통해 유체에 포함된 불순물을 유추하는 방법으로 크게 분류할 수 있다. 이러한 모니터링방법을 통해 전체 풍력발전기 내부의 부유물의 구성, 청결상태, 기계내부에서의 유체의 흐름 등을 파악할 수 있고 이러한 정보들은 곧 시스템 전체의 상태를 알려주는 지표가 된다.

3.2 하위 시스템을 통한 상태모니터링

하위 시스템 (subsystem) 에 기초한 CMS는 풍력발전기의 신뢰성을 높이고, 안정적인 전력공급을 보장하고 있다. 하위시스템에 대한 연구는 로터, 기어박스, 전기부품으로 분류된다.

3.2.1 로터

로터는 풍력발전기의 중요한 부품으로 풍력발전기에 운행과 직접 관계있는 부분으로 회전축의 회전속도를 통해 시스템의 이상을 감지한다.

1) 출력특성에 따른 모니터링⁸⁾

풍속과 풍력발전기의 출력에너지의 관계는 로터 상태에 직접적으로 영향을 받기 때문에 이상이 없는 시스템의 운행 데이터를 통해 이상영역을 정의한 후 실제 운행시의 출력이 이러한 이상영역을 넘어가면 시스템이상으로 진단한다.

2) 스펙트럼 해석(Spectral Analysis)과 Order Analysis⁸⁾

일정한 속도로 회전하는 날개에 의한 풍력에

너지의 변환은 일반적으로 측정지점에 대한 가속도 성분의 FFT를 통해 해석되지만, 날개의 속도가 일정하지 않고 다양하게 변할 때는 회전방향 각도의 가속도성분을 이용한 "Order Analysis"를 사용하는 것이 더 효과적이다.

$$a(t) \xrightarrow{\text{보간}} a(\alpha_R) \xrightarrow{FFT} \bar{A}(\text{Ord})$$

3) 스트레인 모니터링을 통한 모니터링

외부 하중에 의한 재료 내부의 응력은 변형률로 측정될 수 있는데 높은 하중에 의해 발생하는 크랙의 경우 이러한 변형률의 측정으로 초기에 진단될 수 있다. 변형률 측정 센서는 구조적으로 최대의 변위가 발생하는 부위에서 측정하는 것이 효과적이고 연속적인 모니터링을 통해 하중 패턴이나 급격한 하중 변화에 대한 정보를 준다.

DTSS (Distributed Temperature and Strain Sensor) 와 같은 장비를 통해서 응력과 변형률, 온도를 독립적으로 측정할 수 있다.⁹⁾

4) 광섬유(Optical Fibers)이용 모니터링

전기적인 스트레인 게이지는 오랜 시간이 지나면 접착불량, 미끄러짐, 피로 그리고 시간에 따른 전기적인 오차의 증가로 인해 장기간의 운행이 예상되는 풍력발전기에는 광섬유 센서가 이상적인 측정 장비이다.¹⁰⁾ FO (Fiber-Optic) 센서나 FBG (Fiber Bragg Grating) 센서의 경우 넓은 대역의 측정이 가능하고 신호처리 후에도 재보정이 필요 없다.¹¹⁾

5) 관성센서(Inertial Sensing)¹²⁾

블레이드의 손상은 모달특성에 확연한 영향을 주기 때문에 이러한 변화는 관성센서를 통해 가속도, 속도, 운동방향등을 측정하여 손상의 정도를 파악한다. 관성센서의 측정범위는 가속도의 경우 9g, 각가속도의 경우는 5300 deg/sec² 이다.

6) 패턴인식(Pattern Recognition)¹³⁾에

기초한 음향방출(Acoustic Emission)검사 음향방출 (Acoustic Emission) 은 블레이드에 적용되는 기술로 블레이드 표면에 압전센서를 부착하여 내부에 위치한 음원을 통해 크랙과 같은 이상을 감지하는 기술로 낮은 크기의 신호도 검출할 수 있고 측정영역이 20~1200kHz 로 고감도의 특성을 갖는다. 이러한 AE 데이터를 AEGIS 라는 pattern recognition 소프트웨어를 이용하여 크랙의 위치와 손상의 정도를 파악한다.

7) 구조 신경 시스템(Structural Neural System, SNS)¹⁴⁾

블레이드의 크랙의 위치를 초기에 진단하는 방법으로 블레이드 표면에 신경망처럼 붙여진 여러 개의 스트레인 게이지를 통해 크랙의 위치를 파악한다.¹⁵⁾

3.2.2 기어박스

풍력발전기의 운행 특성상 기어박스의 기계부품들은 거친 운행조건에 있고, 풍력발전기 출력

및 안정적인 운행에 직접적인 연관이 있다.

1) 스펙트럼 해석(Spectral Analysis)¹⁶⁾

풍력발전기는 기어박스나 구조의 진동신호를 통해 시스템의 상태를 알 수 있다.¹⁷⁾

부위별로 측정된 기어의 진동 신호의 power density spectrum (PDS) 을 통해 크랙의 존재와 해당 주파수를 알게 되면 운행 중인 기어의 회전 속도로부터 기어의 크랙 위치를 정확하게 파악할 수 있다.¹⁸⁾

2) 셉스트럼 해석(Cepstrum Analysis)¹⁹⁾

신호에서 주기적인 성분을 제거함으로써 시스템의 이상신호를 가장 극명하게 나타내주는 방법으로 기존의 PDS를 이용한 Spectral Analysis보다 개선된 기어박스의 진단법이다.²⁰⁾

3.2.3 전기 시스템

풍력발전기의 원활한 운행과 보수비용의 저감을 위해서 발전기와 같은 전기부품에 대한 모니터링이 필요하다.

1) 제너레이터²¹⁾

해상 풍력발전단지의 경우 접근이 용이하지 않기 때문에 부품의 수명, 성능에 대한 신뢰성과 함께 유지보수 시간간격도 커야 원활한 발전이 가능하다. 발전기와 관련된 손상은 아래 표.2 와 같다.²²⁾

Table 2 풍력발전기의 부위별 고장 비율²²⁾

부위	베어링	스테이터	로터	기타
%	40%	38%	10%	12%

이러한 전기부품에 대한 모니터링은 스테이터와 로터의 전류, 스테이터의 전압, 로터 스피드와 온도의 측정을 통해 이루어진다.

2) 시간영역 해석²¹⁾

발전기의 상태를 판단할 수 있도록 스테이터, 로터에서 측정된 신호들은 시간영역에서 이상 징후 판단에 사용된다.

4. 결론

본 연구에서는 풍력발전기의 이상진단을 위한 방법들을 전체 시스템과 하부 시스템으로 분류해서 확인하였고, 하부시스템에서의 모니터링방법은 잦은 고장을 일으키는 부위인 로터, 기어박스, 발전기와 같이 세분하였다.

풍력발전기는 긴 수명시간, 약 20년간 고장없이 운행되어야 차세대 발전으로서 인정받을 수 있고 나아가 기존의 화력발전을 대체하고 일상의 에너지원으로 사용될 수 있다. 이미 유럽은 이러한 풍력발전에 대한 가능성을 인정하고 많은 투자를 하고 있으며, 독일과 같은 선진국은 2006년까지 20,622 MW의 에너지를 풍력발전을 통해 얻고 있다. 이러한 풍력발전기의 사용을 더욱 가속화하기 위해서는 고장이 없는 원활한 운행, 원격

지에 위치한 풍력발전기에 대한 운전상태 감시, 이상징후에 대한 조기 진단과 같은 기술들의 적용을 통해 전반적인 풍력발전기의 안정된 운영을 뒷받침하여야 하고, 상태모니터링 시스템이 기본적인 토대를 만들 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 서울대학교 2 단계 BK21 사업단과 경상대학교 2단계 BK21 사업단, 그리고 두산 중공업(과제번호 BKM-2006-30)의 도움을 받아 진행되었습니다.

References

- [1] G.M. Joselin Herbert, S. Iniyar, E. Sreevalsan and S. Rajapandian, August 2007 "A review of wind energy technologies", Volume 11, Issue 6, Pages 1117-1145
- [2] K. Jonasson, Tillståndsövervakning av vindkraftverk - Utvärdering av system utfört av SKF Nova, Elforsk rapport 01:30, 2001 Available at: www.elforsk.se
- [3] B. K. N. Rao (ed.), 1996, Handbook of Condition Monitoring, Oxford: Elsevier Science Ltd
- [4] J.P. Verhoef, T.W. Verbruggen, juni 2001, Conditiebewaking aan windturbines; Een verkennende studie. ECN-C--058
- [5] T.W. Verbruggen, April 2003, "Wind Turbine Operation & Maintenance based on Condition Monitoring WT-Ω" Final Report"
- [6] Knud Ole Helgesen Pedersen, Henrik Havemann, "An Alternative Approach to Power Engineering".
- [7] Christopher A. Walford, 2006, "Wind Turbine Reliability: Understanding and Minimizing Wind Turbine Operation and Maintenance Costs"
- [8] Peter Caselitz Jochen Giebhardt, 2004, "Rotor Condition Monitoring for Improved Operational Safety of Offshore Wind Energy Converters"
- [9] www.sensornet.co.uk
- [10] www.smartfibres.com/SHM
- [11] Wernicke J, Shadden J, Kuhnt S, Byars R, Rhead P and Damaschke, 2004 (London, UK, 22- 25 November), "Field experience of fibre optical strain sensors for providing real time load information from wind turbine blades during operation" Paper presented at the European Wind Energy Conf.
- [12] Lars Lading, Malcolm McGugan, Peder Sendrup, Jørgen Rheinländer and Jens Rusborg, 2002, "Fundamentals for Remote Structural Health Monitoring of Wind Turbine Blades - a Preproject", Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark May
- [13] A G Dutton, M J Blanch, P Vionis, D Lekou, D R V van Delft, P A Joosse, A Anastassopoulos, D Kouroussis, T Kossivas, T. P. Philippidis, T. T. Assimakopoulou, G Fernando, C Doyle, A Proust, "ACOUSTIC EMISSION CONDITION MONITORING OF WIND TURBINE ROTOR BLADES: LABORATORY CERTIFICATION TESTING TO LARGE SCALE IN-SERVICE DEPLOYMENT"
- [14] M.J. Schulz, M.J. Sundaresan, May 30, 2002 - April 30, 2006, "Smart Sensor System for Structural Condition Monitoring of Wind Turbines"
- [15] M. Sundaresan, G. Grandhi, M. Schulz, Kirikera, 2002, Melbourne, Australia, "Embedded Continuous Sensor for Monitoring Damage Evolution in Composite Materials," SPIE Conference on Smart Structures, Devices, and Systems, RMIT University, December 16-18,
- [16] P. Caselitz, J. Giebhardt, "Advanced Condition Monitoring System for Wind Energy Converters."
- [17] J. Giebhardt, P. Caselitz, ISET; J. Rouvillain, MITA Teknik, DK; T. Lyrner, Nordic Windpower, Sweden; C. Bussler, Plambeck Neue Energien; S. Gutt, Brüel & Kjaer Vibro; H. Hinrichs, Overspeed; K. Gram-Hansen, Gram&Juhl, DK; N. Wolter, Deutsche Montan Technologie; Giebel, Risø DK, 2004, Wilhelmshaven, Germany, "Predictive, "Condition Monitoring for Offshore Wind Energy Converters with respect to the IEC61400-25 standard", DEWEK Available at: www.iset.uni-kassel.de/osmr/
- [18] Johan Ribrant, 2005/2006, "Reliability performance and maintenance- A survey of failures in wind power systems", (Master Thesis, KTH School of Electrical Engineering, Sweden).
- [19] P. Caselitz, J. Giebhardt, M. Mevenkamp, 1997, "Application of Condition Monitoring Systems in Wind Turbine Converters," EWEC, Dublin
- [20] Peter Caselitz Jochen Giebhardt, 2004, "Rotor Condition Monitoring for Improved Operational Safety of Offshore Wind Energy Converters"
- [21] Lucian Mihet Popa, Birgitte-Bak Jensen, Ewen Ritchie and Ion Oldea, 1990, "Condition Monitoring of Wind Generators,"
- [22] Ole Holst-Jensen, Ingemannsson Aarhus, 2001, "Advanced Condition Monitoring of Wind Turbines"