

풍력터빈의 베어링 상태 모니터링

한국과학기술정보연구원
전문연구위원 장태현
(changtae@reseat.re.kr)

1. 서론

1980년대 이후 풍력터빈 기술은 터빈 크기와 시장의 역할에 관한 큰 성장을 경험하였다. 대 규모의 풍력터빈, 저속운전(low speed operation) 그리고 계속하여 상승하는 보수비용에 대한 요구에 대해, 시스템 상태의 모니터링(CMS: condition monitoring system)에 대한 관심은 빠르게 증가하였다. 터빈의 주 부품은 모든 CMS에 관심이 집중되었다. 이는 부품들의 높은 수리비용과 장치의 정지를 야기시켰기 때문이다. 그들의 고장의 다수는 베어링의 기능 정지 때문이었다. 그래서 베어링 상태 모니터링은 필수적이다.

국내에서 이 분야의 연구로는 양용군 등(1)은 Romax 소프트웨어를 사용하여 풍력터빈의 베어링 수명평가를 해석하였고, 이진호(2)등의 연구에서 한국전력 컨소시엄의 Smart Renewable 프로젝트 대상인 660kW급 풍력터빈과 200kWh급 리튬-이온 배터리에너지저장장치를 이용하여, 풍력터빈의 출력을 평활화시키는 원활한 제어(Smoothing Control)와 일정시간동안 균일한 출력을 낼 수 있게 하는 정출력 제어(Constant Power Control)의 두 가지 기법을 시뮬레이션 하였다. 김동영 등(3)은 이론적으로 피치드라이브의 수명을 예측하고 Romax Designer 소프트웨어를 사용하여 피치드라이브 구성품들에 대한 해석을 통해 부하 상태 및 작동상황에서의 상태를 예측하였다.

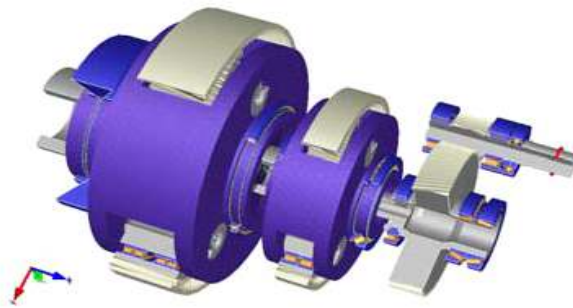
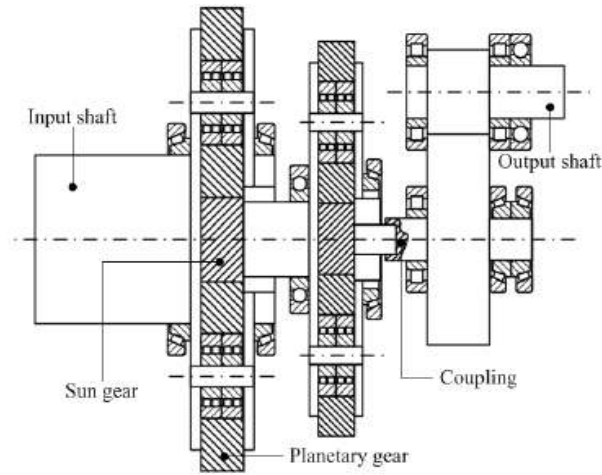
박현용 등(4)은 기어박스에 의해 야기된 진동을 연구하였고, 이성근 등(5)은 수직축 풍력발전기와 같이대규모 수직하중을 받고 있는 테이프베어링(KBC 30312J)를 대상으로 가속도계를 통해 진동신호를 검출하여 운전중 베어링의 결함을 진단하였다.

Henrique 등(6)의 연구에서, 풍력터빈의 시장은 2018년까지 풍력에너지 누적이 <Fig.3> 과 <Fig.4>와 같이 2015년 보다 43% 증가할 것으로 예측하였다. 오늘날 풍력에너지는 신뢰할 수 있는 재생에너지로 성장하고 있지만, 산업계는 주부품의 고장을 겪고 있다. 이는 운전과 보수비용을 증가시켰다.

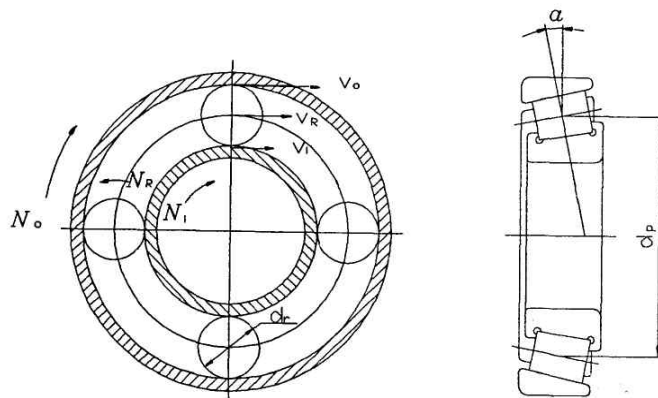
예를 들면, 베어링에서 조기 결함이 3년 이하의 운전에서 혹은 예측된 수명의 5-10%에서 발견되었다. 기어박스 고장률은 1년당 145터빈에서 한사고씩 발생한 것이다.

O&M 비용은 중요하다. 왜냐하면 육상 풍력시설의 LIFE CYCLE 비용의 20%-30% 그리고 해상 풍력은 30% 까지 고장원이 되기 때문이다.

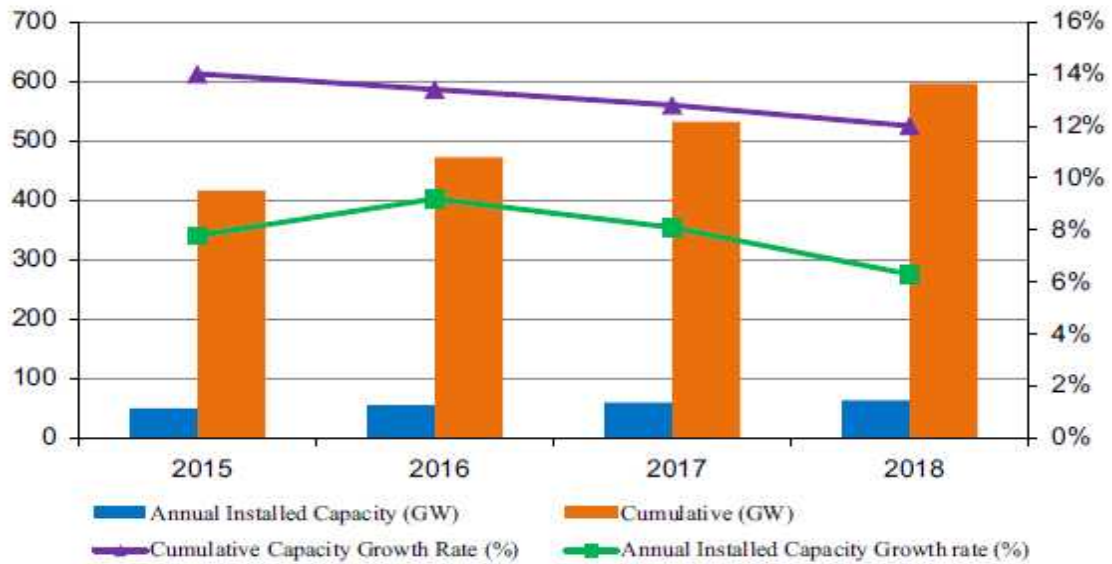
Dong Yang 등(7)은 풍력터빈의 진동신호로부터 주파수 추출 특징 측정에 대한 소음억제 방법을 연구하였다.



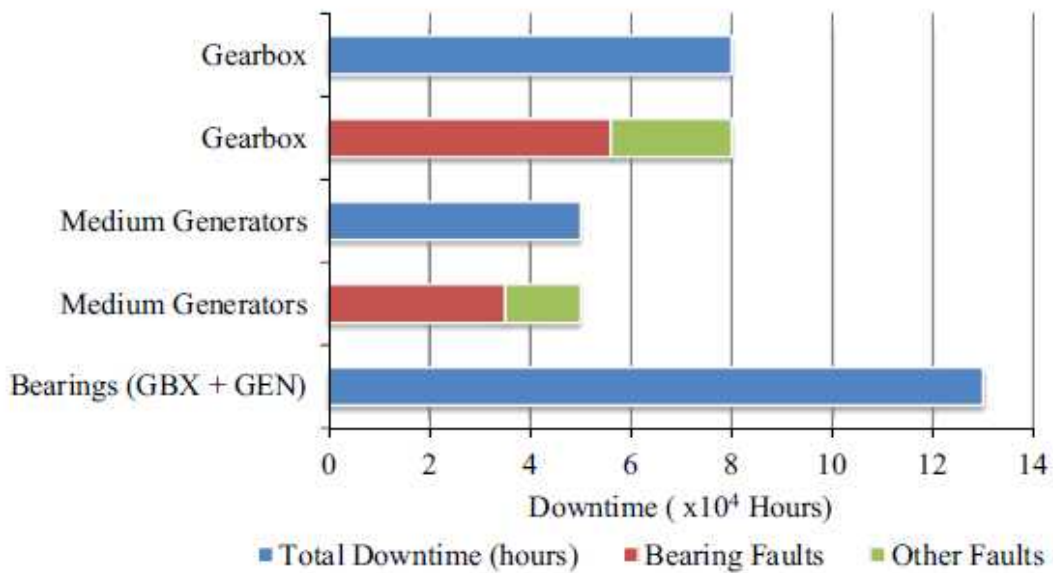
<Fig. 1> Schematic of two planetary gear stages, one helical wheel stage.¹⁾



<Fig.2> 이성근 결과 Rolling velocities⁵⁾



<Fig. 3> Market forecasto f wind energy for 2015 - 2018. Source: Adapted by the authors using⁶⁾



<Fig. 4> Aggregated Downtime for Gear box and Medium Generators(1MWo Po2 MW)⁶⁾

2. 베어링의 상태 모니터링의 정의와 중요성

풍력터빈의 베어링 고장에 대한 영향을 이해하는 것이 중요하다. 최근의 연구에서, 베어링은 기어박스 운전정지의 약 70%와 발전기 정지의 약 21%-70%를 야기시켰다. <Fig.2>는 기어박스과 중형발전기의 정지시간을 나타내고 있다. 교정이나 예방 보수는 이들 고장을 피하기에 충분하지 않다. 예방보수는 시간기반정비 (Time Based

Maintenance TBM)이고 두 개의 주요한 문제점에 직면하고, 이는 보수 중과 과대 보수이다.

3. 데이터 수집 기술

3-1. 음향 계측

음향 모니터링은 진동모니터링과 유사하다, 차이는 진동 감지기는 복잡한 부품에 단단하게 설치되어있다. 반면에 음향 감지기는 유연성 있게 접촉되어있다. 이들은 하나의 마이크로폰으로 내적으로 압력이나 진동으로 전환시키거나 외적으로 전압신호로 전환시킨다. 운전하고 있는 풍력터빈으로부터 발산되는 음원은 두 개의 범주로 나눌 수 있고, 기계적 소음과 공기역학상의 소음이고, 터빈 부품의 상호관계에서나 터빈 날개를 넘어서는 공기유동으로부터 발생하고, 풍력터빈 소음 수치로부터 네가지 다른 형태의 소음으로 분류된다. 이들은 음조(tonal), 광대역(broadband), 저주파수, 그리고 충동(impulsive)이다.

가장효과적인 음향기준 베어링 건전상태 모니터링은 음향발산(AE: acoustic emission)이고, 이는 기계적이나 열적부하상태에서 변형에너지로부터 빠른 방출로부터 야기되는 일시적 충동이다. AE의 주요한 이용은 크랙(crack)의 탐지이다.

3-2. 전기적 영향 모니터링

모터, 발전기 그리고 축전지 등의 전기장치의 모니터링은 비정상 상태로부터 전압과 전류의 해석을 이용하여 수행한다. 축전지에 대해서는 상태나 용량을 입증하기 위하여 임피던스(impedance)를 계측한다. 전기저항은 확실한 풍력터빈(WT) 부품의 구조평가에 이용할 수 있다. 이 기술은 발전기의 베어링 크랙과 일반적인 결함 발견에 사용할 수 있다. 몇가지 기술이 유용하고, 방전계측, 속도계측, 접촉력 계측, 그리고 오일 분석 등이다.

3-3. 전력의 질

wind farm은 더욱 엄격한 순응기준을 만족시켜야하고, 이는 에너지 기반이 보다 큰 풍력에너지의 참여를 포함하기 때문이다. 풍력의 질은 더욱 좋아야하고 신뢰할 수 있어야 한다. 구동축에서 계측한 기계적 힘이나 발전기 측에서 측정된 전력은 기계적 혹은 전기적 결함에 의해서 분류된다. 몇가지 고장은 베어링의 고장과 같은 기계적 혹은 전기적 에너지에 대한 영향으로 탐지된다. 만약 고장이 장치에서 비틀림 변화를 야기시켰다면, 이는 기계적 동력으로 탐지할 수 있다.

동력의 질은 원격감시체제(SCADA: supervisory control and data acquisition)로 달성할 수 있다. 통계적 표시기가 베어링에 대한 간단한 수치 혹은 문제를 나타내기 위하여 사용할 수 있다. 계측들은 요구된 해석에 대한 필요한 데이터를 얻는 터빈의 변압기에 대하여 수행할 수 있고, 고전압과 함께 잠금장치, 센서 그리고 절연과 계다가 입력전류 등

은 이들 계측에 이상적이다.

3-4. 온도 모니터링

풍력터빈 부품의 온도는 시스템 상태의 모니터링의 가장 일반적인 방법 중의 하나이고, 이 방법은 방지책 혹은 예방보수로 사용될 수 있다. 베어링 온도와 같은 개별적인 부품의 온도 계측은 아주 중요하고 더 많은 정보를 얻을 수 있다. 예를 들면, 온도는 부하와 함께 변하고, 베어링에서 온도의 발생해석에 의해서, 고장으로 온도가 증가하는지 혹은 고 부하로 온도가 상승하는지를 식별하기위하여 중요하다. 온도에 대한 부하 영향을 줄이기 위해 유효한 분석은 구동하는 발전기의 말단 베어링의 온도와 구동하지 않는 베어링의 온도차를 관찰한 것이다.

온도계측에는 몇가지 센서가 있다. 가장 일반적인 것이 저항식온도 계측기(resistance temperature detector), 광온계 그리고 저항식 온도계(resistant thermometer)이다. 보통 고장은 부품의 악화 혹은 기계적 마찰이나 불량한 전기 연결로부터 보조 부품의 품질 저하 등에 의해서 야기된다.

베어링과 기어박스에서 마찰은 부족하거나 불충분한 윤활유 특성 혹은 부적당한 결합으로 인한 충격으로 야기되어 온도를 상승시킨다.

3-5. 오일 찌꺼기 검색

풍력터빈 베어링과 기어는 계속하여 손상을 입는 상태에 있고, 이는 부스러기나 찌꺼기를 야기시킨다. 손상이 증가함에 따라, 더 많은 찌꺼기가 발생하고, 이들은 윤활을 수행한다. 이들은 온라인 시스템으로 행해지고, 풍력터빈에는 민감한 센서와 입자계수기 설치되어있다. 오일라인 시스템에서 매번 입자들은 센서를 통과하고, 전지적 펄스가 생성된다. 오프라인 시스템에서, 주기적인 샘플을 얻어 분석할 수 있다. 오일입자의 농도와 특성은 결합과 위치의 지표로서 작용한다.

오프라인 오일찌꺼기 검색은 조기검색의 실제상태의 모니터링과 손상을 추적하는 것이다. 오일모니터링은 대개 주기적 샘플을 취하여 실행된다. 이 상태는 변하고, 온라인 오일 모니터링은 직접적인 파손의 엄격한 계측과 진행을 제공함으로 보편적이다.

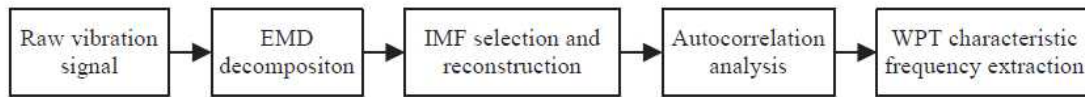
4. 진동상태 모니터링

4-1. EMD 상관식을 바탕으로 특징 주파수 추출 방법

4-1-1. 특징 주파수 추출 방법의 개요

경험적 모드분해법(EMD: empirical mode decomposition) 특징에 대한 참고는 신호들을 주어진 다른 주파수 내재모드함수(IMF: intrinsic mode function)의 합으로 분해할 수 있는 것이고, 고장 진단 주파수(fault feature frequencies)를 포함하는 IMF는 우수한 고장 진단에 대한 새로운 신호를 만들기 위해 선정되었다. 이 신호는 자기상관성

(autocorrelation) 해석을 통하여 가공된다. 소음을 제거하고 특징은 WPT를 이용하여 추출된다. 즉, 효과적으로 진동신호의 스펙트럼을 추출한다. 이 단계는 <Fig. 5>에 나타낸다.



<Fig. 5> Flowchart of the method of de-noising and feature frequency extraction with EMD-Correlation

4-1-2. EMD 알고리즘

EMD의 목적은 신호들을 IMF 합으로 분석하는 것이다. IMF는 극한 혹은 영전위검출(Zero-crossing)의 동일번호를 가진 함수로 정의 된다. 이 수는 국소 최대와 최소로 정의 되고, 영(Zero)에 관하여 대칭적이다. IMF는 단순조화함수에 대한 등가물로서 단순한 진동모드를 나타낸다.

주어진 신호 $S_1(t)$ 이면, EMD의 출발점은 모든 국소 최대 혹은 최소의 검정이다. 모든 국소 최대는 3차원 스플라인 곡선(spline curve)으로 연결되고, 상위 envelope $e_u(t)$ 로서 역할을 한다. 모든 국소 최소 값은 스플라인 곡선으로 연결되고, 저위 envelope $e_l(t)$ 로서 역할을 한다. 두 envelope의 평균은 $m_1(t)=[e_u(t)+e_l(t)]/2$ 로 나타내고, 신호로부터 제한다. IMF의 형태는 다음 식(1)과 같이 주어진다.

$$h_1(t) = S_1(t) - m_1(t) \tag{1}$$

주어진 $h_1(t)$ 는 영전위검출 사이에서 최대의 배수를 나타낸다. 시프트 절차(shifting procedure)는 각각 IMF 형태 $h_k(t)$ 에 적용하였다. 이 과정에 일반적으로 사용된 표준은 다음 식(2)와 같이 나타낸다.

$$SD = \sum_{t=0}^T \frac{1}{h_{k-1}^2(t)} |h_{k-1}(t) - h_k(t)|^2 \tag{2}$$

여기서 SD는 시작점보다 작다. 첫 IMF $c_1(t)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$r_1(t) = S_1(t) - c_1(t) \tag{3}$$

잔여 $r_1(t)$ 는 유용한 정보를 가지고 있어, 다음 식(4)를 얻는다.

$$\begin{aligned}
 r_1(t)-c_2(t)&=r_2(t) \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 r_{n-1}(t)-c_n(t)&=r_n(t) \quad (4)
 \end{aligned}$$

전체 과정은 잔여 $m(t)$ 가 일정하거나, 단조로운 경사 혹은 단지 하나의 극값을 가진 함수일 할 때 완료된다. 식(3)과 식(4)를 결합하면, EMD의 본래의 신호는 다음 식(5)가 된다.

$$S_1(t)=\sum_{k=1}^n c_k(t)+r_n(t) \quad (5)$$

4-2. 자기상관(autocorrelation) 해석 알고리즘

주어진 입력신호 $S_2(t)=w(t)+n(t)$ 에서 $S(t)$ 는 유용한 신호이고, $w(t)$ 는 백색소음 그리고 $n(t)$ 는 단기의 외부방해 소음이다. $S_2(t)$ 의 자기상관 계수는 식(6)으로 주어진다.

$$R_y(\tau)=\{S_2(\tau)S_2(\tau+\tau)\}=R_s(\tau)+R_w(\tau)+R_n(\tau)+R_{sw}(\tau)+R_{sn}(\tau)+R_{ns}(\tau)+R_{wn}(\tau)+R_{nw}(\tau) \quad (6)$$

여기서 $R_s(\tau)$, $R_w(\tau)$ 그리고 $R_n(\tau)$ 는 유용한 신호, 백색소음, 단기외부소음의 자기상관계수이다. 유용한 신호, 백색소음, 단기외부소음 중에는 상관계수는 없다. 다른 말로, $R_{sw}(\tau)\approx 0$, $R_{ws}(\tau)\approx 0$, $R_{sn}(\tau)\approx 0$, $R_{ns}(\tau)\approx 0$, $R_{wn}(\tau)\approx 0$, 그리고 $R_{nw}(\tau)\approx 0$ 이다. 단기외부방해 소음이 단지 짧은 기간에 존재한다. 입력신호 $S_2(t)$ 는 공정한 자기상관과 함께 처리되고 식(7)로 주어진다.

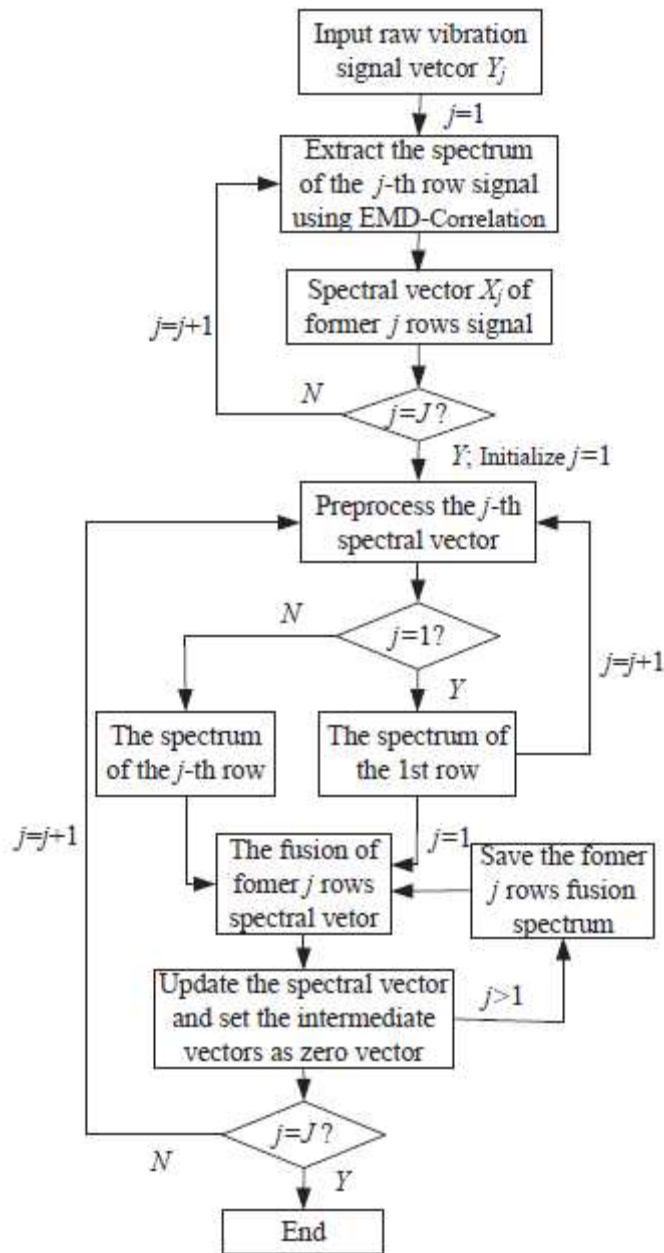
$$S_3(\tau)=\frac{\sum S_2(t+\tau)S_2^*(t)}{1/(M-|\text{lags}|)} \quad (7)$$

여기서, $*$ (), M 은 신호의 연결(conjugation)과 길이이고, lags는 평가와 연관된 지연벡터이다.

4-3. ART-2 데이터 융합을 보유한 EMD 상관식 모델

ART-2(adaptive resonance theory-2)는 비학습된 신경망(neural network)이다. 진동 수집점의 J그룹이 풍력터빈에 검지되었다고 가정하면, 원시 진동데이터의 J그룹은 수집된다. 이들 원시데이터를 극대화하기 위하여, 전 고장에 대한 정보를 가진 특별한 스펙트럼을 얻고, 모든 진동 데이터는 다음 벡터형식으로 기록한다. 즉, 시스템 입력으로서 $Y_i(y_{j1}, y_{j2}, \dots, y_{jn})$ 이고, 여기서 $j=1, 2, \dots, J$; n 은 스펙트럼의 좌표이다. 진동벡터 Y_j 의 해석 과정은

<Fig.6>에서 나타내고 다음과 같다.



<Fig. 6> Analysis flowchart of vibration signals when the EMD-Correlation model supplemented with multi-point data fusion is used⁷⁾

① 고장 특성벡터 스펙트럼 X_j 는 추출되어, 스펙트럼 $X_j(x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jn})$ 은 J그룹의 원시벡터로부터 EMD 상관계를 통하여 얻는다.

②스펙트럼 벡터는 예비적으로 처리된다. 첫째, 만약 $j \leq J$ 이면 j값은 평가되고, 입력 신호 X_i 는 아래식과 같이 스펙트럼벡터를 프로세스하기 위해 사용된다.

$$\begin{aligned} Z_{pi} &= x_j i + a u_{pi}; \quad s_{pi} = Z_{pi} / \| Z_p \| \\ v_{pi} &= f(s_{pi}); \quad u_{pi} = v_{pi} / \| V_p \| \end{aligned} \quad (8)^\ddagger$$

여기서 $i = 1, 2, \dots, n$; u_{pi} 의 초기값이고, 0이다. a 가 10은 양의 피드백 계수이다. $\| \cdot \|$ 은 벡터 값이다.

$f(t)$ 는 비선형 한계함수이고, 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} f(t) &= 0 \quad (0 \leq t \leq \theta) \\ &= t \quad (t \geq \theta) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 θ 는 $\frac{1}{\sqrt{n}}$, n 은 무차원 스펙트럼 벡터이다.

폐쇄 루프 과정 $Z_p \rightarrow SP \rightarrow V_p \rightarrow U_p \rightarrow Z_p$ 는 다음식이 얻어질 때까지 반복한다.

$$\| U_p^{k+1} - U_p^k \| < \varepsilon \quad (10)$$

여기서, U_p^{k+1} , U_p^k 은 $k+1$ 와 k 에서 벡터 U_p 의 반복 값이다.

③스펙트럼 벡터의 특징이 입증되었다. 만약, $j=1$ 이면, 스펙트럼 벡터의 특징이 식(11)과 같이 확립된다.

$$\begin{aligned} z_i &= u_{pi} + a u_i; \quad s_i = z_i / \| Z \| \\ v_i &= f(s_i) + b f(u_i); \quad u_i = v_i / \| V \| \end{aligned} \quad (11)$$

④스펙트럼 벡터의 특징이 추출되었다면, 스펙트럼 벡터의 융합과 스펙트럼 벡터 X_i 는 다음 식(13)과 같이 프로세스 된다.

$$\begin{aligned} z_i &= u_{pi} + a u_i; \quad s_i = z_i / \| Z \|; \quad v_i = f(s_i) + b f(q_i) \\ u_i &= v_i / \| V \|; \quad p_i = u_i + d f_{svi}; \quad q_i = p_i / \| P \| \end{aligned} \quad (13)$$

‡; H. B. Aradhye, J.F. Davis, B.R, Bakshi, “Art-2 and multiscale art-2 for on-line process fault detection-validation via industrial case studies and Monte Carlo simulation, Annu. Rev. Control 26(1), 2002,113-127.

⑥스펙트럼 벡터의 특징이 갱신된다. 중간벡터는 0으로 설정되고 스펙트럼 벡터는 다음

과 같이 개정된다.

$$F_{sv}=P; U_p=0, U=0, Q=0 \quad (14)$$

J값이 할당되면, $j=J$ 이면, 모든 스펙트럼 벡터는 프로세스 되고, 얻어진 F_{sv} 는 모든 스펙트럼 벡터로부터 정보를 융합한다. $j \neq J$ 이면, $j=j+1$ 를 주고, 다음 벡터 X_j 를 계산하기 위하여 단계②를 반복한다.

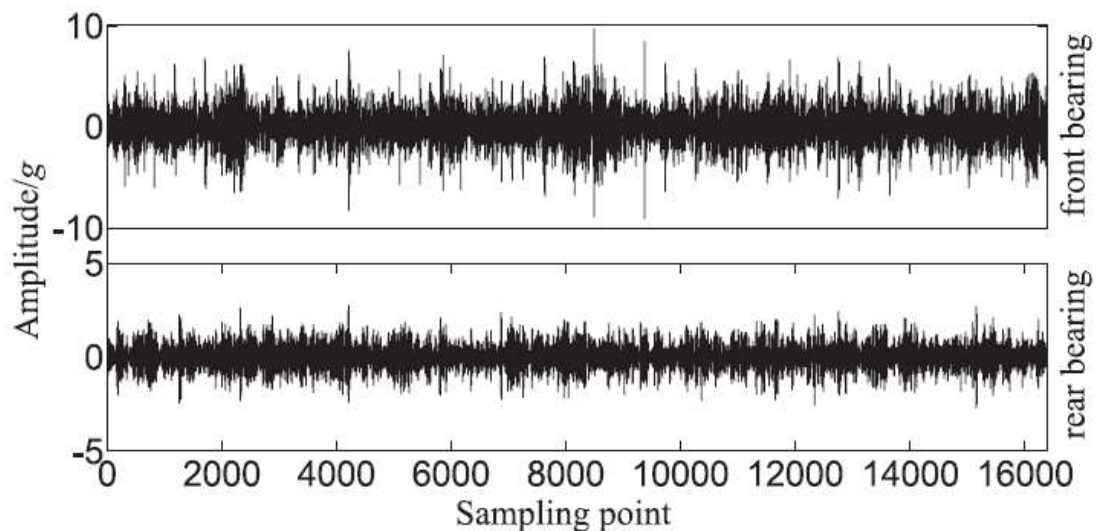
5. 풍력터빈 베어링 파손에 대한 진동 신호 해석

5-1. 풍력터빈 파손베어링으로부터 측정된 진동신호 해석

DFID(doubly fed induction generator)를 장비한 1.5MW의 풍력발전시스템의 파손진동 신호는 제의된 잡음 제거방법의 유효도를 검증하기 위해 해석되었다. 발기의 전단과 후단 베어링의 수집된 원시 신호는 <Fig.7>에 나타난다. 발전기 전단 베어링 진동은 정상적인 베어링의 것보다 더욱 분명하다.

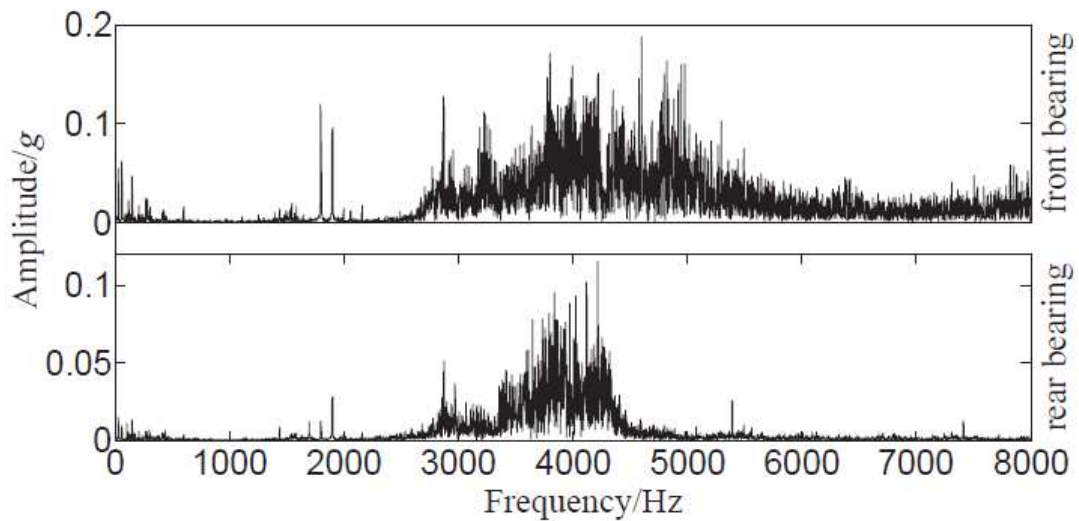
5-2. 풍력터빈 진동신호의 소음특성 해석

발전기의 전단과 후단 베어링의 진동신호 스펙트럼이 FFT(fast Fourier transform)로 추출되어 <Fig. 4>와 같이 실제 측정된 진동 소음의 주파수를 <Fig.4>와 같이 해석하기 위하여 변형되었다.

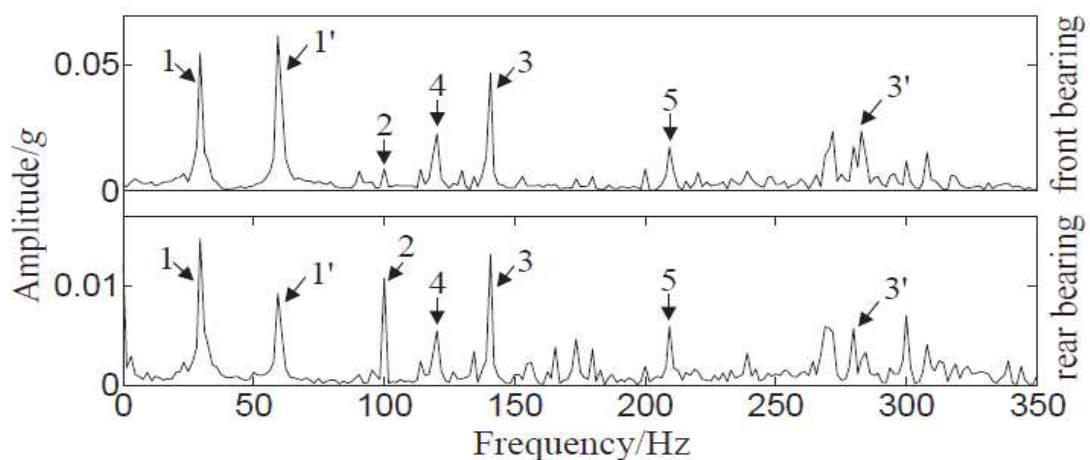


<Fig. 7> Raw vibration signals of the generator front and rear bearings⁷⁾

<Fig.8>은 진동신호의 에너지가 2500Hz이상의 고주파수 범위에 집중되었다. 이 범위는 발전기 전단과 후단 베어링의 고유주파수이다.



<Fig.8> Vibration spectra extracted by FFT⁷⁾



<Fig.9> Low-frequency vibration spectra extracted by WPT⁷⁾

<Fig.9>의 저주파수 범위의 주파수 스펙트럼은 WPT(Wavelet Package Transform)⁺에 의해 추출되었고, 발전기의 전단 및 후단 베어링이 350Hz이하의 저주파수 범위에 있다. <Fig.9>는 주파수 특징 1과 1'는 발전기회전 주파수 30Hz에 상응한다. 이들 주파수는 축 커플링의 부적당한 결합에 의해 야기되었을 것이다. 주파수 특징 3과 3'는 143.8Hz에서 <Table 1>과 같이 발전기 전단 베어링의 내부링의 파손 주파수 특징에 상응한다.

＋ ; 박철원의 3인, “고장전류를 이용한 동기발전기 보호”, 대한전기학회 춘계논문집(2006, 11)

이들 주파수들은 발전기의 전단베어링의 링에서 고장을 두드러지게 했다. 스펙트럼

밴드 3 ‘와 마찬가지로 주파수 크기 2, 4 그리고 5는 <Table 1>의 고장 주파수 특징과 상응하지 않는다.

이들 주파수들은 풍력터빈의 진동신호의 단기의 방해소음으로서 분류할 수 있다.

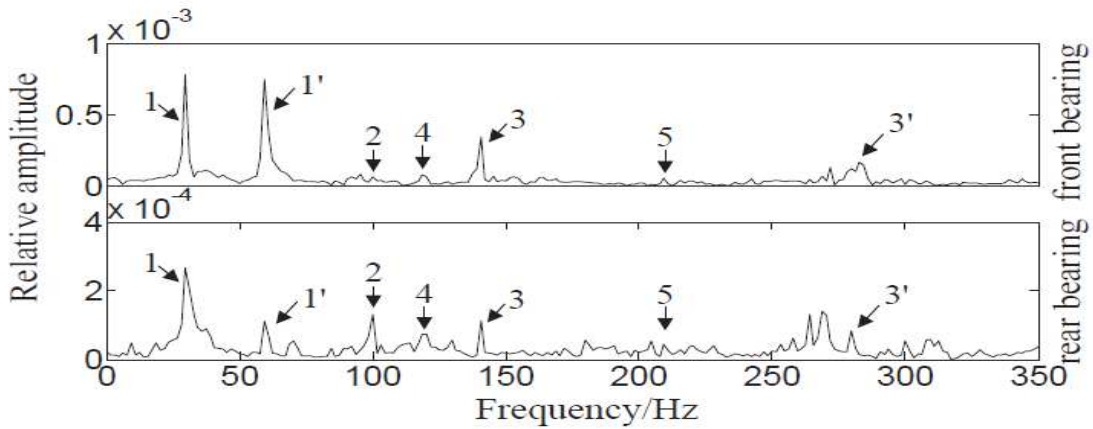
<Table 1> Calculated fault feature frequencies of the front and rear bearings of the wind turbine generator⁷⁾

Feature frequency type	Front bearing of the generator	Rear bearing of the generator
Fault feature frequency of the inner ring of the bearing	141.88Hz	84.5Hz
Fault feature frequency of the outer ring of the bearing	69.43Hz	43.76Hz
Fault feature frequency of the rolling element	37.09Hz	43.76Hz
Fault feature frequency of the cage	9.92Hz	10.56Hz

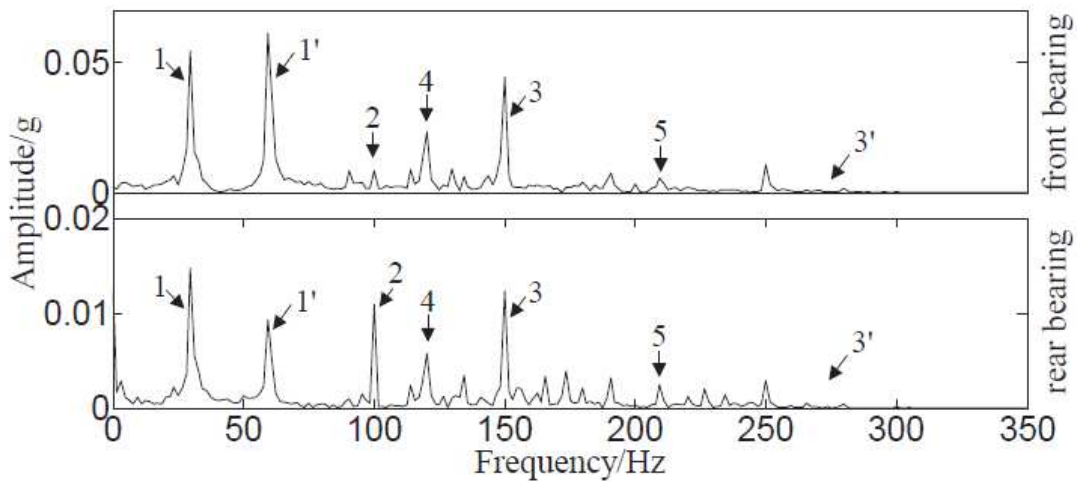
5-3. 단일 계측 점에서 주파수 특징에 대한 다른 잡음제거 비교

풍력터빈의 진동신호에서 EMD상관식과 WPT방법으로 소음제거를 시도한다. 추출 주파수 특징에 대해 다른 방법의 유효도(effectiveness)를 비교한다. EMD상관식을 통해 풍력터빈의 전단 베어링 진동신호를 해석하는 과정에서, 발전기 전단 베어링의 진동신호는 먼저 EMD에 의해 IMF의 15개로 분석하였다. IMF 스펙트럼의 분석결과 IMF5의 에너지가 주로 500Hz에 집중되고 IMF4는 대부분 100Hz에 집중되었다. 저 등급 IMF는 빠른 진동 모드를 나타내었다. 고 등급 IMF는 느린 진동모드를 보였다.

<Fig.10>은 백색소음의 정도를 나타내고, 짧은 방해 소음은 이 스펙트럼에 남아있다. 그러나 전기한 소음은 <Fig.5>에서 보인 WPT에 의해 추출된 스펙트럼과 비교하여 현저하게 억제되었다. 왜냐하면, 백색소음의 자기상관계수와 짧은 방해소음은 거의 0과 같다. 더욱이 고장 특징은 <Fig.6>과 같이 더욱 분명하다.



<Fig.10> Vibration spectra extracted by EMD-Correlation⁷⁾



<Fig. 11>Vibration spectrum extracted by wavelet hard threshold WPT⁷⁾

<Fig.11>은 짧은 방해 소음이 <Fig.9>와 같이 억제되지 않음을 나타낸다. 왜냐하면, 백색 소음은 고정된 시작점을 설정함으로 제거되기 때문이다. 그래서 풍력터빈 진동신호에서 짧은 방해소음 제거는 도움이 되지 않는다. 그러므로 제의된 EMD-상관식 방법이 백색 소음과 짧은 방해소음을 웨이브렛을 이용한 잡음 제거 기법(wavelet hard threshold)-WPT보다 유효하게 억제할 수 있다.

6. 결론

(1)풍력터빈 부품의 온도는 시스템 상태의 모니터링의 가장 일반적인 방법중의 하나이고, 이 방법은 방지책 혹은 예방보수로 사용될 수 있다. 베어링 온도와 같은 개별적인 부품의 온도 계측은 아주 중요하고 더 많은 정보를 얻을 수 있다.

(2)경험적 모드분해법(EMD: empirical mode decomposition) 특징에 대한 참고는 신호들

을 주어진 다른 주파수 내재모드함수(IMF: intrinsic mode function)의 합으로 분해할 수 있는 것이고, 고장 진단 주파수(fault feature frequencies)를 포함하는 IMF는 우수한 고장 진단에 대한 새로운 신호를 만들기 위해 선정되었다. 이 신호는 자기상관성 (autocorrelation) 해석을 통하여 가공된다.

(3) 풍력터빈 진동신호에서 짧은 방해소음 제거는 도움이 되지 않는다. 그러므로 제안된 EMD-상관식 방법이 백색소음과 짧은 방해소음을 웨이브렛을 이용한 잡음 제거 기법 (wavelet hard threshold)-WPT보다 유효하게 억제할 수 있다.

<참고문헌>

1. 양용균, 최창, 장기, 허철수, 류성기, "풍력터빈 기어박스의 베어링 수명 계산에 관한 연구", 한국기계가공학회지, v.13 no.5, 2014년, pp.21 - 27
2. 이 진호, 이 문환, 에너지저장장치를 이용한 풍력발전의 출력 평준화 제어 기법 연구, 한국신·재생에너지학회 2010년도 추계학술대회 초록집 요약문.
3. 김동영*, 이인범*, 양용균*, 류성기, "5MW 풍력용 Pitch Drive 구성품의 부하에 관한 연구" 한국기계가공학회지, v.13 no.1, 2014년, pp.115 - 120
4. 박현용 ; 박정훈, "주파수 응답해석을 통한 풍력발전기용 기어박스의 동특성 해석", 한국신재생에너지학회 2010년도 추계학술대회 초록집 요약문.
5. 이성근 ; 박영일 ; 이희원 ; 김영석, "수직축풍력발전기 하부베어링용 테이퍼롤러 베어링의 결합진단시스템 개발", 한국산업안전학회지, v.11 no.2 ,pp. 42 - 51 , 1996
6. Henrique Dias Machado de Azevedo, Alex Maurício Araújo n, Nadèege Bouchonneau, A review of wind turbine bearing condition monitoring: State of the art and challenges, Renewable and Sustainable Energy Reviews 56(2016)368 - 379.
7. Dong Yang, Hui Lia, Yaogang Hu, Jie Zhao, Hongwei Xiao, Yongsen Lan, Vibration condition monitoring system for wind turbine bearings based on noise suppression with multi-point data fusion, Renewable Energy 92 (2016) 104-116.

이 분석물은 과학기술정보통신부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.