

3MW 풍력발전기 진동상태감시 및 진단시스템 프레임워크

Vibration Monitoring and Diagnosis System Framework for 3MW Wind Turbine

손종덕[†]·엄승만*·김성태*·이기학*·이정훈*

Jong-Duk Son, Seung-Man Eom, Sung-Tae Kim, Ki-Hak Lee and Jeong-Hoon Lee

(Received May 20, 2015 ; Revised June 24, 2015 ; Accepted August 4, 2015)

Key Words : Wind Turbine(풍력발전기), Vibration(진동), Monitoring(감시), Diagnosis(진단), Framework(프레임워크)

ABSTRACT

This paper aims at making a dedicated vibration monitoring and diagnosis framework for 3MW WTG(wind turbine generator). Within the scope of the research, vibration data of WTG drive train are used and WTG operating conditions are involved for dividing the vibration data class which included transient and steady state vibration signals. We separate two health detections which are CHD(continuous health detection) and EHD(event health detection). CHD has function of early detection and continuous monitoring. EHD makes the use of finding vibration values of fault components effectively by spectrum matrix subsystem. We proposed framework and showed application for 3MW WTG in a practical point of view.

1. 서 론

최근 화석에너지 고갈과 환경문제로 인해 신재생 에너지 개발이 이루어지고 있고, 바람에너지를 이용한 풍력발전은 세계적으로 대체에너지로서 주목 받고 있다.

그런데 풍력발전기는 화력이나 원자력 발전설비와는 달리 발전용량대비 다수의 설비가 넓게 분포되어 있어 O&M(operation and maintenance) 관리가 쉽지 않은 상황이다.

특히 해상풍력발전은 고장발생 시 풍속과 파고에 따른 풍력발전기 접근에 제약이 있기 때문에 중대사고 예방과 O&M 관리를 위해 부품 고장을 조기에

감지하여 정비계획을 수립하는 것이 필수적이다.

최근 풍력발전기 상태감시 시스템은 예지정비 및 상태기반정비 측면에서 조기에 부품고장을 감지하고 적시에 정비시기를 결정하는 중요한 도구로 알려져 있다⁽¹⁾.

풍력발전기 상태감시 시스템 관련 연구는 유럽에서 CONMOW(condition monitoring offshore wind turbine)⁽²⁾, Offshore M&R(advanced maintenance and repair for offshore wind farms using fault prediction and condition monitoring techniques)⁽³⁾ 등 대규모 풍력단지 실증 프로젝트를 통해 풍력설비의 상태감시 및 진단기법 연구를 수행하였다. 특히 진동센서를 이용한 상태감시 시스템은 풍력발전기 회전기계 부품 상태감시 및 진단에 적합하다고 알려

[†] Corresponding Author ; Member, Doosan Heavy Industries & Construction

E-mail : jongduk.son@doosan.com

* Doosan Heavy Industries & Construction

A part of this paper was presented at the KSNVE 2015 Annual Spring Conference

‡ Recommended by Editor Heung Soo Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

져 있고⁽⁴⁾, 국내에서도 상태감시 및 진단 기법에 대한 연구를 수행 중이다⁽⁵⁾.

이 논문은 3MW 풍력발전기에서 주요 회전기계를 구성하는 메인 베어링, 증속기, 발전기에서 진동 데이터를 이용하여 상태감시 및 진단시스템의 프레임워크 구축방법을 제안한다.

2. 진동상태감시 및 진단시스템

진동상태감시 및 진단 대상은 두산중공업에서 개발한 3MW급 풍력발전기 WinDS3000 모델이다. 풍력발전기는 풍속과 풍향의 변화에 대해 최적의

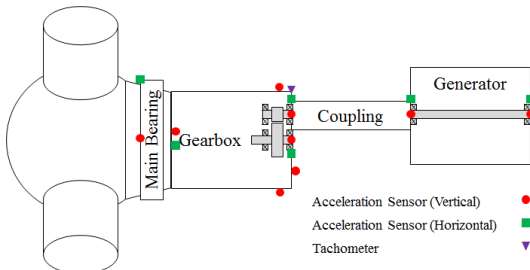


Fig. 1 Sensor position of 3MW wind turbine

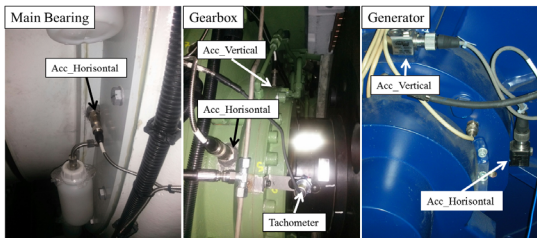


Fig. 2 Sensor installation of 3MW wind turbine

Table 1 Operating conditions for classifying vibration data

Gearbox 3rd stage rotating speed[rpm]	Rotating speed variation [rpm]	Time delay [s]	Active power [MW]	Pitch/Yaw action
700~900	15	20	-	- / -
1,400~1,550	50	15	1.6 > 2.0 <	- / -
1,400~1,550	50	15	2.0 > 3.0 <	- / -
1,400~1,550	50	15	3.0 ≥	Off / Off
1,400~1,550	50	15	3.0 ≥	- / -

출력을 생산하도록 설계하고 제작된 설비이다. 최적의 제어를 위해 풍력발전기는 PLC(programmable logic controller)를 이용하여 토크(torque)제어뿐 아니라 피치(pitch) 및 요(yaw)제어를 수행한다. 그리고 풍력발전기에서 로터(rotor) 및 증속기 축의 회전속도가 시동풍속 3 m/s부터 중단풍속 25 m/s까지 가변구간과 정속 구간이 존재한다.

일반적으로 풍력발전기 진동상태감시 시스템은 가변구간과 정속 구간을 포함하는 알람(alarm)설정을 위해 발전출력, 증속기 출력 축 회전속도, 풍속 등의 정보를 PLC로부터 전달받아 측정된 진동 데이터를 분류하여 데이터베이스(database)에 저장한다. 그리고 정속 구간은 가변구간보다 상대적으로 신호처리 및 진단분석이 용이한 편이라 정밀진단분석에 사용한다.

ISO 13372:2004에서도 설비진단을 상태감시와 진단으로 나누어 정의하고 있는데, 상태감시는 간이진단에 대응하고, 진단은 정밀진단에 대응하는 개념이다⁽⁶⁾.

3MW 풍력발전기 진동측정시스템 구성은 Fig. 1과 같고, 가속도센서 15개, 레이저 타코미터(laser tachometer) 1개를 설치하였다. 그리고 Fig. 2는 설치 사진이며 가속도센서 체결은 볼팅(bolting) 또는 메탈본드(metal bond)로 고정하였고, 레이저 타코미터는 볼팅체결 하였다.

취득된 진동데이터는 Table 1과 같이 풍력터빈 운전조건에 따라 진동데이터를 클래스(class)로 분류하여 데이터베이스에 저장한다.

3. 프레임워크

풍력발전기의 성능저하를 나타내는 결함데이터를 수집하기 위해서는 2절에서 언급한 가변구간과 정속 구간에서 결함의 특징을 나타내는 유효한 특징 추출하는 과정이 필요하다. 그리고 각 결함주파수의 특징들은 Fig. 3과 같이 시간영역(time domain)에서 통계적인 계산을 수행하고, 스펙트럼영역(spectrum domain) 영역에서 베어링과 GMF(gear mesh frequency)등 결함주파수를 수학적으로 계산한 주파수 정보와 비교하여 진동 값을 추출할 수 있다.

이 논문에서는 풍력 진동상태감시 및 진단 프레임은 Fig. 4와 같이 제안한다. 전체 시스템은 CHD

(continuous health detection)과 EHD(event health detection)으로 나누어져 있다. CHD 먼저 온라인 장비를 통해 취득하며 진동데이터는 Table 1의 운전조건에 따라 분류한다. 그리고 분류한 진동데이터는 시간영역에서 통계적으로 계산된 특징 값으로 실시간으로 간이진단 또는 조기감지(early detection)를 수행하는데 활용한다. 만약 CHD에서 계산된 특징 값이 알람(alarm) 설정 값 정상이면 계속 모니터링 하고, 비정상이면 EHD 단계로 이동한다. 또한

EHD는 결함주파수 특징들을 활용하여 고장위치를 판단하는 정밀진단에 사용한다.

3.1 CHD

CHD는 Table 1에서 정의된 터빈 운전영역에 따라 진동데이터를 식 (1)~(3)과 같이 실효 값, 침도, 파고율 등의 통계 값을 계산하여 클래스(class)로 분류한다. 그리고 알람 설정 값은 ISO 10816-3 규격 또는 VDI 3834-1 규격을 참고자료로 사용한다.

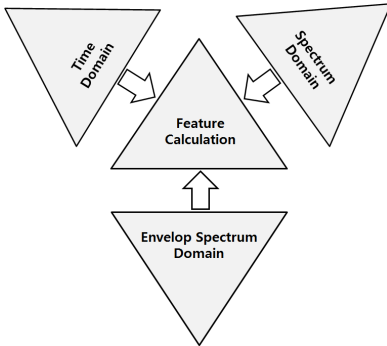


Fig. 3 Ranges of calculating features

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}} \tag{1}$$

$$x_k = \frac{E(y_i)^4}{\sigma^4} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\left(\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \right)^4} \tag{2}$$

$$x_c = \frac{|x_{peak}|}{x_{rms}} \tag{3}$$

여기서 x_i 는 진동데이터, \bar{x} 는 진동데이터 평균을 나타낸다.

3.2 EHD

EHD는 Fig. 5와 같이 주파수 영역과 포락 주파수 영역에서 식 (4)~(9)으로 계산된 결함주파수를 협대역 피크(peak) 추출방법으로 진동 값을 찾아 결함주파수행렬을 구성한다.

$$f_r = \frac{rpm}{60} = rps \tag{4}$$

$$FTF = f_c = \frac{f_r}{2} \left[1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \phi \right] \tag{5}$$

$$BSF = f_s = \frac{P_d}{2B_d} f_r \left[1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \cos \phi \right)^2 \right] \tag{6}$$

$$BPFO = f_o = N(FTF) = \frac{f_r}{2} N \left[1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \phi \right] \tag{7}$$

$$BPF1 = f_i = N(f_r - FTF) = \frac{f_r}{2} N \left[1 + \frac{B_d}{P_d} \cos \phi \right] \tag{8}$$

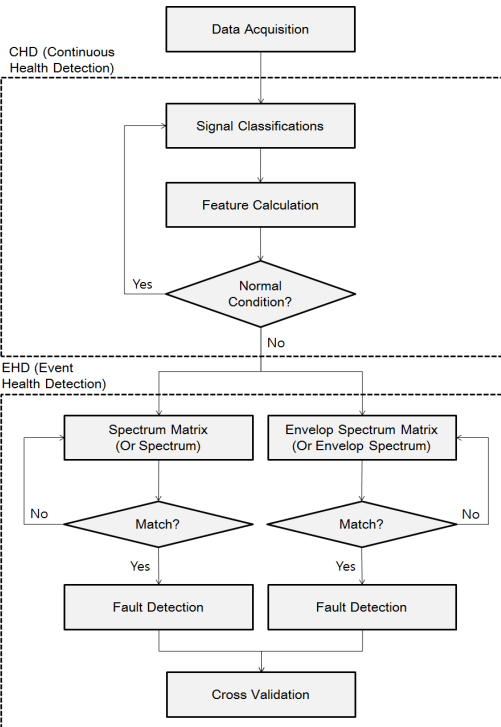


Fig. 4 Flowchart of proposed framework

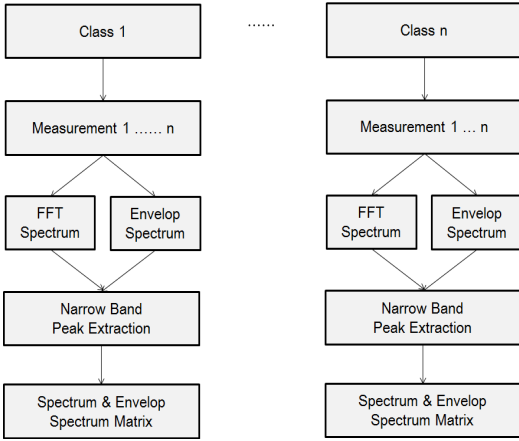


Fig. 5 Flowchart of spectrum matrix subsystem

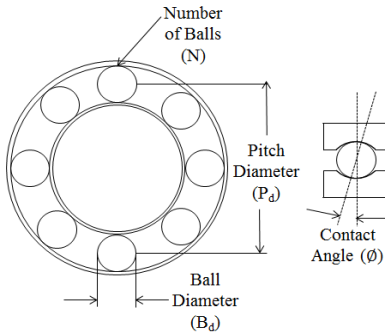


Fig. 6 Ball bearing

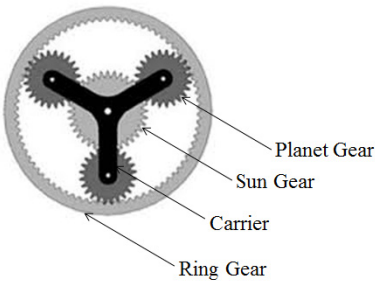


Fig. 7 Planet gear

베어링 결합주파수 계산은 식 (4)~(8)과 같고, f_r 는 축의 회전속도, B_d 는 베어링 볼의 지름, P_d 는 피치 지름, N 은 볼의 수, ϕ 은 접촉각이다(Fig. 6). 그리고 기어 GMF(gear mesh frequency) 계산은 식 (9)와 같고, T_R 은 링 기어 잇수, T_S 는 선(sun)기어 잇수, N_O 는 캐리어(carrier)의 회전속도, N_R 은 링 기어의 회전속도,

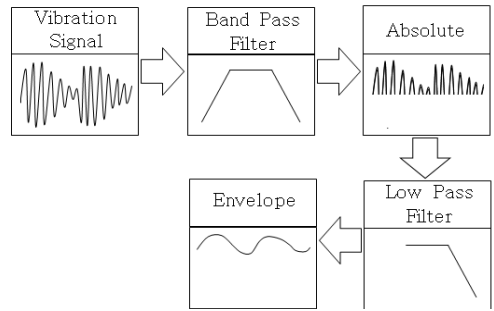


Fig. 8 Envelope signal processing

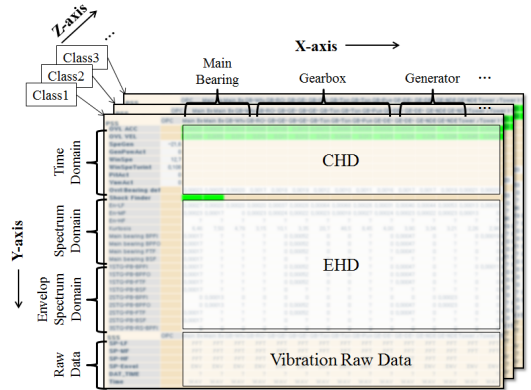


Fig. 9 Screen capture of proposed system

N_S 는 선 기어의 회전속도이다(Fig. 7).

$$(T_R + T_S) \times N_O = (T_R \times N_R) + (N_S \times T_S) \tag{9}$$

포락 주파수 계산은 진동 원 신호에서 Fig. 8과 같이 대역통과 필터, 절대값, 저역통과 필터 후 처리를 통해 포락선 추출 후 FFT(fast Fourier transform)를 수행한다.

CHD와 EHD 행렬들을 Fig. 9와 같이 풍력발전기 진동상태감시 시스템의 사용자 인터페이스에 가시화하여 나타내었다. X축은 진동 측정위치, Y축은 시간, 주파수 영역에서의 특징 값을 나타내었고, 운전 영역에 따른 분류는 Z축에 클래스를 분류하였다. 그리고 행렬정보 외에 결합진단 정밀분석 수행을 위해 각 행렬의 진동 원 데이터(raw data) 확인이 가능하도록 구성하였다.

실제 CHD는 Fig. 10과 같이 터빈 운전데이터인 증속기 3단 회전속도와 출력으로 5개의 클래스를 분류하여 진동 값을 식별할 수 있다.

후기

이 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(No. 20133010021750)의 일환으로 수행되었습니다.

References

- (1) Idriss, E. and Erkki, J., 2012, On the Development of Condition based Maintenance Strategy for Offshore Wind Farm: Requirement Elicitation Process, Energy Procedia 24, pp. 328~339.
- (2) Cozens, N. J. and Watson, S. J., 2003, State of the Art Condition Monitoring Techniques Suitable for Wind Turbines and Wind Farm Applications, Report for CONMOW Project.
- (3) Condition Monitoring for Offshore Wind Farms Final Report, 2005, Advanced Maintenance and Repair for Offshore Wind Farms Using Fault Prediction and Condition Monitoring Techniques(Offshore M&R), European Commission, DG TREN under the FP5 Contract.
- (4) Fausto, P. G. M., Andrew, M. T., Jesus, M. P. P. and Mayorkinos, P., 2012, Condition Monitoring of Wind Turbines: Techniques and Methods, Renewable Energy 46, pp. 169~178.
- (5) Kim, S. Y. et al., 2012, Discussion on Analysis Technique of Acceleration Signal for Condition Monitoring of Wind Turbines, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 261~262.
- (6) Yang, B. S. et al., 2006, Machine Condition Monitoring and Diagnosis by ISO Standard(Vibration II), Korea Certification Institute for Machine Diagnostics.

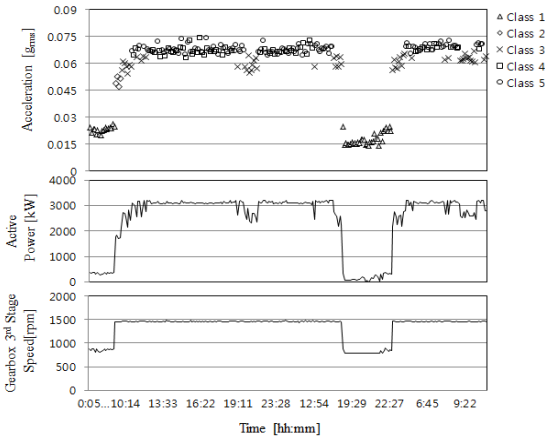


Fig. 10 CHD with WTG data

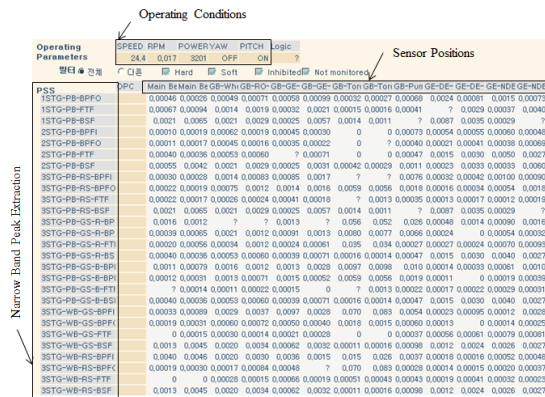


Fig. 11 EHD matrix

그리고 EHD는 Fig. 11과 같이 CHD에서 확인된 운전영역 시점의 센서 위치에 따라 결함주파수 행렬을 확인할 수 있다.

4. 요약 및 향후 계획

풍력발전기 상태감시 및 진단 시스템 프레임워크를 제안하였다. 회전속도가 변화하는 풍력발전기 운전 특성에 따라 가변구간과 정속구간에 따른 진동데이터 클래스를 분류하여 간이진단이 가능하고, 스펙트럼 보조행렬을 이용하여 단시간에 정밀진단을 수행할 수 있다. 향후에는 간이진단 수행 시 출력, 온도, 압력 등의 데이터와 병행하여 진동 특징들간에 상호 상관 패턴 인식을 통한 조기 결함 감지 성능을 향상할 계획이다.



Jong-Duk Son received his B.S., M.S. and Ph.D. degree in Mechanical Engineering from Pukyong National University, Korea, respectively. He is a manager at wind turbine development & engineering team in Doosan Heavy

Industries & Construction. His research interests are vibration analysis, machine condition monitoring, diagnosis and prognosis in power plant.



Seung-Man Eom received his M.S. degree in Mechanical Engineering from Hanyang University, Korea, respectively. He is an assistant manager at wind turbine development & engineering team in Doosan Heavy Industries & Construction. His research interests are structural static & dynamic analysis, machine condition monitoring, diagnosis and prognosis in power plant.



Sung-Tae Kim received his B.S., M.S. and Ph.D. degree in Aerospace Engineering from Seoul National University, Korea, respectively. He is a senior manager at wind turbine development & engineering team in Doosan Heavy Industries & Construction. His research interests are acoustics, vibration, control and site-engineering in

wind turbine plant.



Ki-Hak Lee is a Ph.D. candidate in mechanical and aerospace engineering from Seoul National University, Korea. Since joining Doosan Heavy Industries & Construction in 2007, he is a senior manager at Wind Turbine Development & Engineering team. His research interests are wind turbine blade design, site assessment, Economic analysis and system integration.



Jeong-Hoon Lee received his B.S. degree in Korea University and M.S. degree in KAIST, respectively. He is a general manager at wind turbine development & engineering team in Doosan Heavy Industries & Construction. His research interests are rotor vibration analysis, machine condition monitoring, mechanical system control in power plant.