



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

제주지역 풍력발전단지 유지보수
사례를 통한 상태감시시스템 활용

濟州大學校 産業大學院

風力工學科

夫 吳 元

2017年 2月

濟州地域 風力發展團地 維持補修 事例를 통한 狀態監視시스템 活用

指導教授 高 旻 男

夫 吳 元

이 論文을 風力工學科 碩士學位 論文으로 提出함

2016 年 12 月

夫吳元의 風力工學科 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ (印)

委 員 _____ (印)

委 員 _____ (印)

濟州大學校 產大業學院

2016 年 12 月

A Study on application of the Condition
Monitoring System through the case study of
wind turbine operation and maintenance in Jeju
wind farm

Daewon Boo
(Supervised by professor Kyung-Nam Ko)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the
degree of Master of Engineering

2016. 12.

This thesis has been examined and approved.

.....
Thesis director, Bum-suk Kim, Prof. of Faculty of Wind Energy Engineering

.....
Thesis director, Jong-Chul Huh, Prof. of Mechanical Engineering

.....
Thesis director, Kyung-Nam Ko, Prof. of Faculty of Wind Energy Engineering

.....
Date

Faculty of Wind Energy Engineering.

GRADUATE SCHOOL OF INDUSTRY

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

List of Figures	i
List of Tables	iii
Abstract	iv
I. 서 론	1
1. 연구배경	1
2. 연구목적	5
II. 제주지역 풍력발전단지 운영현황	6
1. 환경풍력 발전단지	6
1.1 개요 및 설비현황	6
1.2 운영실적 분석	7
1.3 고장현황 분석	8
2. 성산풍력 발전단지	12
2.1 개요 및 설비현황	12
2.2 운영실적 분석	13
2.3 고장현황 분석	14
III. 상태감시시스템 O&M 적용을 위한 실제 고장사례 분석	17
1. 진동분석 방법	17
1.1 시간 영역 분석	18
1.2 주파수 영역 분석	18
2. 상태감시시스템 설치 위치	18
3. 유지보수 사례 분석	20
3.1 환경풍력단지 A호기 발전기 교체	20
3.1.1 고장사례	20
3.1.2 상태감시시스템을 활용한 고장 진단	23
3.2 환경풍력단지 B호기 발전기 베어링 교체	26

3.2.1	고장사례	26
3.2.2	상태감시시스템을 활용한 고장 진단	28
3.3	성산풍력단지 C호기 발전기 베어링 교체	30
3.3.1	고장사례	30
3.3.2	상태감시시스템을 활용한 고장 진단	33
3.4	성산풍력단지 D호기 발전기 냉각팬 점검	35
3.4.1	고장사례	35
3.4.2	상태감시시스템을 활용한 고장 진단	36
IV.	결론	39
	참고문헌	40
	감사의 글	42

List of Figures

Fig. 1 Global Annual Installed Wind Capacity 2000–2015	2
Fig. 2 Global Cumulative Installed Wind Capacity 2000–2015	2
Fig. 3 Annual wind energy statistics in South Korea	3
Fig. 4 Regional status on wind turbines installed in South Korea	4
Fig. 5 Layout of wind turbines in Hankyung wind farm	6
Fig. 6 Annual operation data of Hankyung wind farm	8
Fig. 7 Annual wind turbine down time at Hankyung wind farm	9
Fig. 8 The number of annual failure of wind turbine components occurred in Hankyung wind farm	11
Fig. 9 Layout of Wind turbines in Sungsan wind farm	12
Fig. 10 Annual operation data of Sungsan wind farm	13
Fig. 11 Annual wind turbine down time of Sungsan wind farm	15
Fig. 12 The number of annual failure of wind turbine components occurred in Sungsan wind farm	16
Fig. 13 Location of vibration sensors	19
Fig. 14 Vibration sensors used for vibration analysis	20
Fig. 15 Measurement of insulation resistance of generator	21
Fig. 16 The process for replacement of the broken generator	22
Fig. 17 Temperature variation measured at the winding of generator	23
Fig. 18 Time domain analysis for vibration signals measured on the generator NDE	24
Fig. 19 Frequency domain analysis for vibration signals measured on the generator NDE	25
Fig. 20 Generator rotor self-welded	26
Fig. 21 The process for replacement of the broken generator bearings	27

Fig. 22 Time domain analysis for vibration signals measured on generator NDE	29
Fig. 23 Generator bearing temperature sensor inspection(Left) / Auto grease pump inspection(Right)	30
Fig. 24 Thermal relay inspection(Left) / Broken nacelle fan(Right)	31
Fig. 25 The process for replacement of the broken generator bearings	32
Fig. 26 Time domain analysis for vibration signals measured on generator DE	34
Fig. 27 Frequency domain analysis for vibration signals measured on generator DE	34
Fig. 28 Frequency domain analysis after repairing oil leak	35
Fig. 29 Change of the thermal relay current value	36
Fig. 30 Time domain analysis for vibration signals measured on generator NDE	37
Fig. 31 Frequency domain analysis for vibration signals measured on generator NDE	38
Fig. 32 Frequency domain analysis after repairing generator cooling fan ..	38

List of Tables

Table 1 Annual wind energy statistics on installed capacity and energy production in South Korea	3
Table 2 Annual and regional statistics of wind power availability in South Korea	4
Table 3 Information of wind turbines installed in Hankyung wind farm	7
Table 4 Annual operation data of Hankyung wind farm	7
Table 5 Annual wind turbine down time at Hankyung wind farm	9
Table 6 The number of annual failure of wind turbine components occurred in Hankyung wind farm	10
Table 7 Information of wind turbines installed in Sungsan wind farm	13
Table 8 Annual operation data of Sungsan wind farm	13
Table 9 Annual wind turbine down time of Sungsan wind farm	14
Table 10 The number of annual failure of wind turbine components occurred in Sungsan wind farm	16
Table 11 Location of vibration sensors	19
Table 12 Inspection report on generator	21
Table 13 Comparison of operating temperature in the generators	24
Table 14 Comparison of vibration levels of generators and gear boxes	28
Table 15 Enveloped FFT at generator NDE	30
Table 16 Generator cooling fan motor coil resistance	35

Abstract

As wind turbines become bigger to capture more wind energy, it becomes more difficult to operate, maintain and repair wind turbines. In particular, it is not easy to detect wind turbine failure in the early-stage. In Europe, it is popular to use Condition Monitoring System, CMS, for wind turbine Operation and Maintenance, O&M. However, though wind farm owners and operators of Korea know how useful the application of CMS is for their O&M, there are not many reports or investigations in Korea for CMS application to wind turbines.

In this thesis, in order to improve O&M technique based on the real data at real wind farms, CMS technique was applied to wind turbines of Hankyung and Seongsan wind farms on Jeju Island, after availability, capacity factor, annual average wind speed and O&M records of the two wind farms were analyzed for the period from 2011 to 2015. It is revealed that how the wind turbine repair was done when the turbine failure occurred. For installing CMS, 11 sensors were attached on the gearbox, the generator and the tower of wind turbines with which the vibration signals can be captured. Then, four sorts of the components failure were selected as a representative, and the vibration signals from the components were analyzed for time domain and frequency domain.

The results showed that availability of the two wind farms has increased and wind turbine failure has decreased since O&M technique has been improved over the past few years. The failure of generator winding and bearing of wind turbines was detected in the early-stage by the CMS vibration signal analysis. In addition, the CMS detected failure of the hydraulic pump and the generator cooling fan of wind turbines before serious failure of them. Therefore, the prediction and diagnosis of wind turbine failure was possible through the CMS technique, and more case studies should be done to improve CMS technique.

I. 서론

1. 연구배경

화석연료 사용에 따른 이산화탄소 배출로 인한 지구온난화 문제 및 에너지 자원의 부족으로 세계적으로 풍력, 태양광, 연료전지, 수력 등 신재생에너지에 대한 관심과 투자가 증가하고 있다. 그 중에서 풍력발전은 공기의 유동을 가진 운동에너지의 공기역학적 특성을 이용하여 회전자를 회전시켜 기계적 에너지로 변환시키고, 이 기계적 에너지로 전기를 얻을 수 있는 재생 가능하고 무한정한 에너지 자원이자 대기오염이나 온실효과가 없는 청정에너지 자원으로 각광받고 있다. 특히, 신재생에너지원 중 발전단가 및 효율성 측면에서 가장 경쟁력 있는 에너지원으로 평가 받고 있다[1].

2015년 말 파리에서 개최된 제 21차 기후변화협약당사국총회(COP-21)에서 각국의 신 기후체제에 대한 구체적인 협상이 확정되면서 가장 현실적인 경쟁력을 갖춘 화석연료의 대안으로 풍력에너지가 부상하고 있다[2]. 가까운 일본의 경우 2011년 대지진으로 인한 후쿠시마 원전 사고 이후 원전의 대안으로 해상풍력을 채택하고, 민간은 물론 국가 차원에서 강력하게 해상풍력 사업을 추진하고 있다 [2].

이렇듯 전 세계 풍력발전시장은 지속적으로 성장하고 있다. Fig. 1에서와 같이 2015년 전 세계에 신규 설치된 풍력설비 용량이 6만3,467MW에 달한 것으로 조사됐으며, 2015년 풍력설비 누적용량은 Fig. 2와 같이 43만2,883MW 규모로 증가하였다[3]. 이는 원전 400기 이상에 해당하는 수치이며, 풍력발전이 재생에너지 중에서 중추적인 역할을 하고 있음을 알 수 있다[3][4][23].

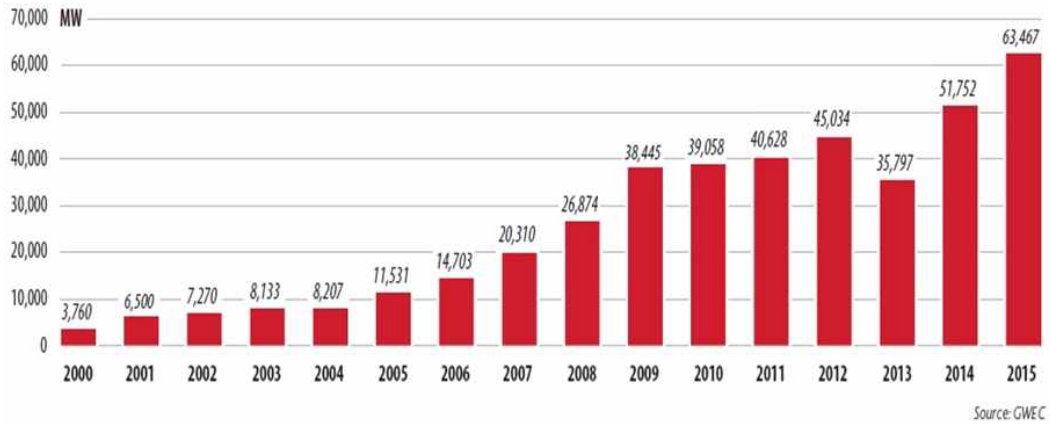


Fig. 1 Global annual installed wind capacity 2000-2015 [3].

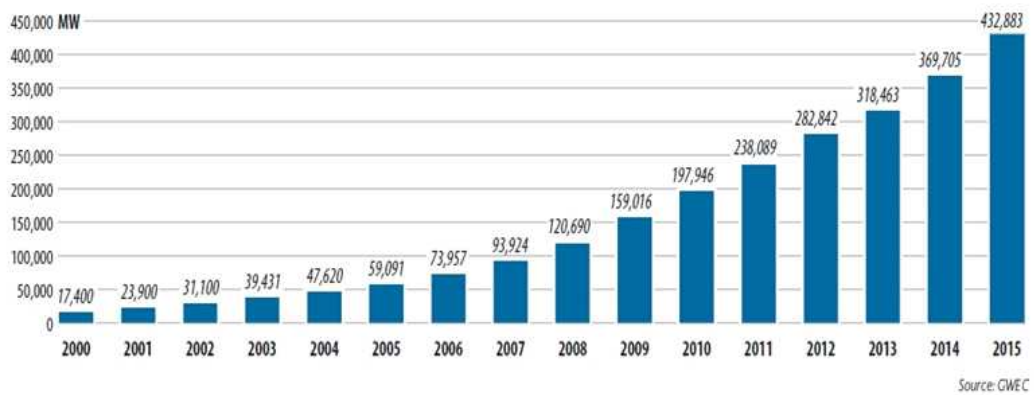


Fig. 2 Global cumulative installed wind capacity 2000-2015 [3].

국내 풍력발전 산업 역시 1997년 제주 행원 풍력발전단지 상업운전을 시작으로 초기에는 각 지방자치단체에 의해 주도되었으나, 점차적으로 한전 발전자회사, 대기업 등 민간기업으로 확대되면서 Table 1, Fig. 3 에서와 같이 지속적인 신규 설비의 확충으로 이어졌고, 오늘날까지 꾸준히 성장하고 있다[5][6].

Table 1 Annual wind energy statistics on installed capacity and energy production in South Korea[5].

년도	설비용량		
	신규	누계	발전량
~99	3,345	3,345	5,839
2000	1,500	4,845	16,685
2001	1,980	6,825	12,590
2002	3,750	10,575	14,881
2003	3,480	14,055	24,865
2004	23,390	37,445	20,067
2005	28,000	65,445	104,685
2006	109,350	174,795	218,839
2007	21,150	195,945	362,198
2008	105,250	301,195	421,360
2009	50,900	352,095	678,104
2010	21,250	373,345	811,788
2011	33,000	406,345	857,645
2012	76,300	482,645	908,447
2013	78,650	561,295	1,143,548
2014	47,200	608,500	1,136,285
2015	196,350	804,850	-

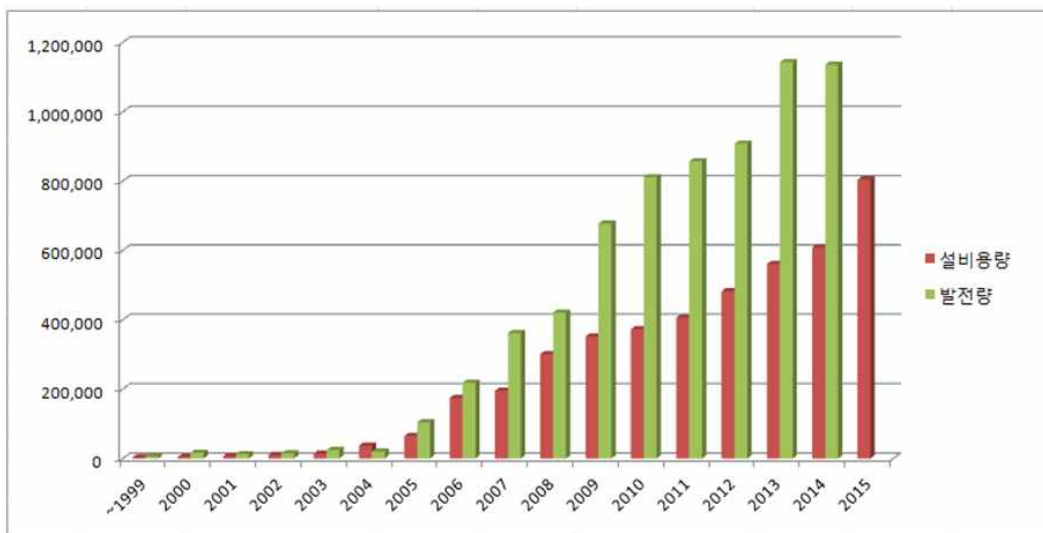


Fig. 3 Annual wind energy statistics in South Korea[5].

Fig. 4는 지역별 풍력설비 운영현황이다. 제주 26.5%, 강원 24.5%, 경북 22.1%로 우리나라 풍력 설비의 대부분을 차지하고 있으며, 이렇게 풍력발전 설비가 특정지역에 편중되어 있는 이유는 Table 2에서와 같이 제주, 강원, 경북 지역은 상대적으로 풍황 조건이 좋아서 풍력 설비 이용률이 높기 때문이다[7].

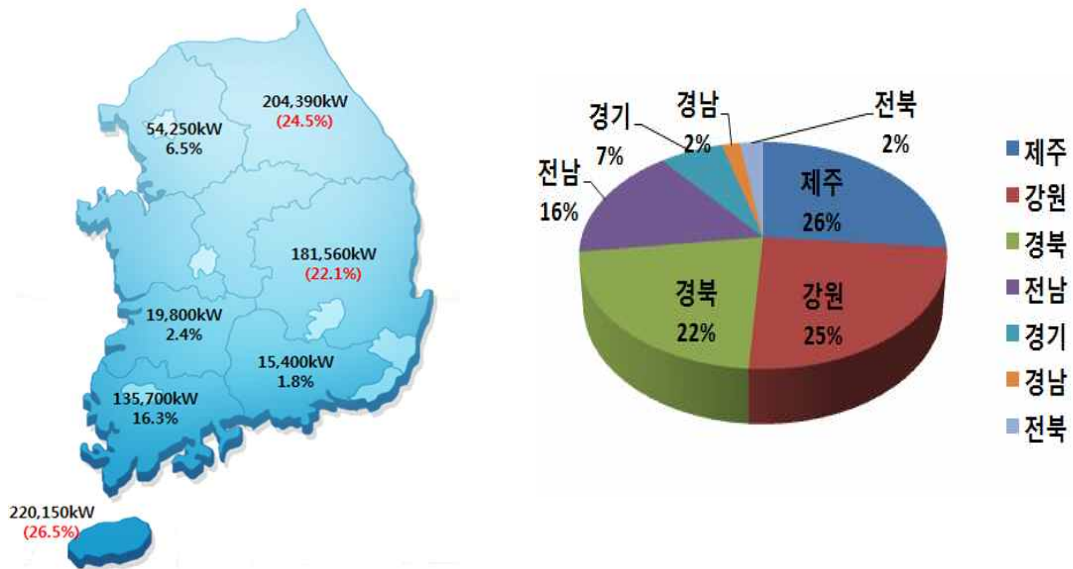


Fig. 4 Regional status on wind turbines installed in South Korea[5].

Table 2 Annual and regional statistics of wind power availability in South Korea[5].

구분	경기	강원	전북	전남	경북	경남	제주
2011	12.24	23.59	13.98	26.34	31.66	17.34	24.23
2012	14.23	21.12	13.60	21.71	29.55	23.79	22.13
2013	12.13	26.89	15.54	11.79	30.49	27.60	25.84
2014	11.46	21.99	12.57	17.05	27.07	21.26	22.68
평균	11.34	23.78	14.10	20.70	29.71	25.03	23.72

2. 연구목적

풍력산업이 전 세계적으로 친환경 미래에너지 개발 산업의 핵심 중 하나로 급 성장하고 있는 현재, 풍력발전기 설치 수가 점차 증가하고 있으며, 효율향상을 위해 풍력시스템이 복잡해지고 있을 뿐 아니라 대형화 되고 있다[8]. 또한 제주도의 경우는 2030년까지 전체 사용전력의 100%를 신재생에너지로 대체하여 탄소 없는 섬 구축을 목표로 하고 있으며, 그에 따라 약 10조원을 투자하여 2GW의 해상풍력을 구축하기 위한 정책을 추진 중이기도 하다[9][24].

그러나 풍력발전설비는 고장 발생 시 작업자가 쉽게 접근하기 어려우며, 보급·확대기반의 조성에 따라 날로 성장하고 있는 해상풍력설비는 육상풍력설비보다 접근성이 더 열악하다. 만일 어떤 고장이 발생하면, 비용을 들여 기어박스, 발전기 등 주요설비를 크레인을 동원하여 교체하여야 하는 경우가 발생할 수도 있다. 해외 풍력 기술 선도국에서는 이러한 풍력시스템의 고장을 조기에 검출하는 상태감시시스템(CMS, Condition Monitoring Systems)을 활용한 연구가 활발히 이루어지고 있다[10]. 그러나 아직까지 우리나라의 상태감시시스템의 활용 및 그 진단기술은 체계적으로 확립되지 않은 상황이다. 따라서 본 논문에서는 제주지역 한경풍력단지 및 성산풍력단지의 유지보수 기록을 통계 분석 하고, 상태감시시스템을 활용한 실제 고장사례 분석을 수행하여 향후 풍력발전단지 운영 정비 효율의 극대화를 목적으로 한다.

본 논문의 구성을 간략히 설명하자면, II 장에서 제주지역 풍력발전단지인 한경 및 성산풍력 발전단지의 운영현황 및 2011년부터 2015년까지의 유지보수 기록을 분석하여 그 현황을 설명한다. 그리고 III 장에서는 II장에서 분석한 유지보수 기록 중 4가지 사례를 선정하여 이 사례에 상태감시시스템을 활용한 고장 진단 기술을 적용하였고, 이 기술의 유효성 및 효율성을 입증하였다.

II. 제주지역 풍력 발전단지 운영현황

본 연구의 분석 대상 풍력 발전단지는 제주시 한경면 신창리에 위치한 한경풍력발전단지와 서귀포시 성산읍 수산리에 위치한 성산풍력 발전단지이다. 이 장에서는 이 두 곳의 풍력 발전단지의 2011년부터 2015년까지의 운영현황을 분석하였다.

1. 한경풍력 발전단지

1.1 개요 및 설비현황

한경풍력 발전단지는 제주시 한경면 신창리·용수리에 위치해 있으며, Fig. 5와 같이 총 9기의 발전기를 운영 중 이다.



Fig. 5 Layout of wind turbines in Hankyung wind farm.

한경풍력 발전단지는 준공시점에 따라 1, 2단계로 나뉘지며, 1단계는 Table 3과 같이 2004년 4월 준공 후 현재까지 운영 중이며 1.5MW 4기로 총 6MW 용량으로 구

성되어 있다. 제작사는 NEG-MICON사의 NM72C 기종이다. 2단계는 2007년 12월 준공 후 현재까지 운영 중이며, 3MW 5기로 총 15MW 용량으로 구성되어 있다. 제작사는 VESTAS사의 V90 기종이다[11].

Table 3 Information of wind turbines installed in Hankyung wind farm.

구 분	설비용량 (단위기×대수)	제작사 (모델)	준 공
한경풍력 1단계	6MW (1.5MW×4기)	NEG-MICON NM72C	'04.04
한경풍력 2단계	15MW (3MW×5기)	VESTAS (V90)	'07.12

1.2 운영실적 분석

Table 4 와 Fig. 6 은 한경풍력 발전단지 2011년부터 2015년까지의 가동률, 이 용률, 평균풍속, 고장건수 등 운영실적을 나타낸다. 여기서 고장건수는 정지시간 3시간 이내 고장은 제외 한다[12].

Table 4 Annual operation data of Hankyung wind farm.

구 분	'11년	'12년	'13년	'14년	'15년
가 동 률 (%)	88.8	94.6	95.0	95.9	94.1
이 용 률 (%)	25.4	24.1	28.9	27.6	23.6
평균풍속 (m/s·년)	7.23	7.12	7.03	6.73	6.63
고장건수 * (기당)	83 (9.2)	81 (9)	78 (8.7)	72 (8)	68 (7.5)

한경풍력 발전단지의 연도별 가동률은 2013년 이후 장기 고장 감소 및 정비능력 향상으로 상승하는 추세이다. 2011년과 2012년도에는 A호기의 메인베어링 손상과 B호기의 기초 구조물 손상, 그리고 C호기의 발전기 제어 프로그램 손상 및 서버 업그레이드 등으로 장기간 정지하여 가동률이 저하되었다.

한경풍력 발전단지의 연도별 이용률은 평균풍속의 감소로 인해 저하되고 있다. 그리고 연도별 고장건수는 매년 감소하고 있다.

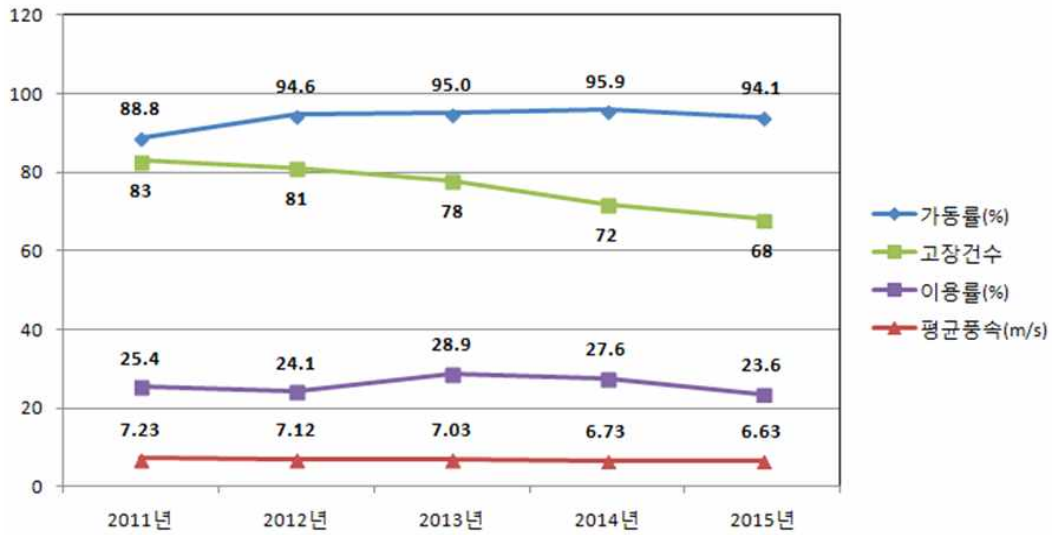


Fig. 6 Annual operation data of Hankyung wind farm.

1.3 고장현황 분석

Table 5 와 Fig. 7 은 한경풍력 발전단지의 연도별 고장 시간에 대한 분석결과이다. 연도별 고장건수에서 5일 이상의 장기간 고장이 특히 감소하였다. 10일 이상의 중대고장은 2011년~2014년 평균 3.7건에서 2015년 1건으로 대폭 감소하였고, 5~10일 고장의 경우 2011년~2014년 평균 8건에서 2015년 4건으로 감소하였다. 하지만 1일 이하의 단기 고장의 경우 지속적으로 발생하고 있으며 연도별 편차는 크지 않다. 한편, 3시간 이하 고장의 경우 전체 고장의 약 52%를 차지하며, 1일 이하 고장의 경우 전체 고장의 약 83.9%이다. 단기간 고장의 점유율이 높은 이유는 전기·제어설비의 노후화에 따른 경년열화 때문인 것으로 풀이된다.

Table 5 Annual wind turbine down time at Hankyung wind farm.

구 분	'11년	'12년	'13년	'14년	'15년	합 계
10일 이상	4	5	3	3	1	16
5일~10일	11	11	7	3	4	36
1일~5일	15	17	13	14	16	75
3시간~1일	53	48	55	52	47	255
3시간 이하	125	117	101	118	120	581
합 계	208	198	179	190	188	963

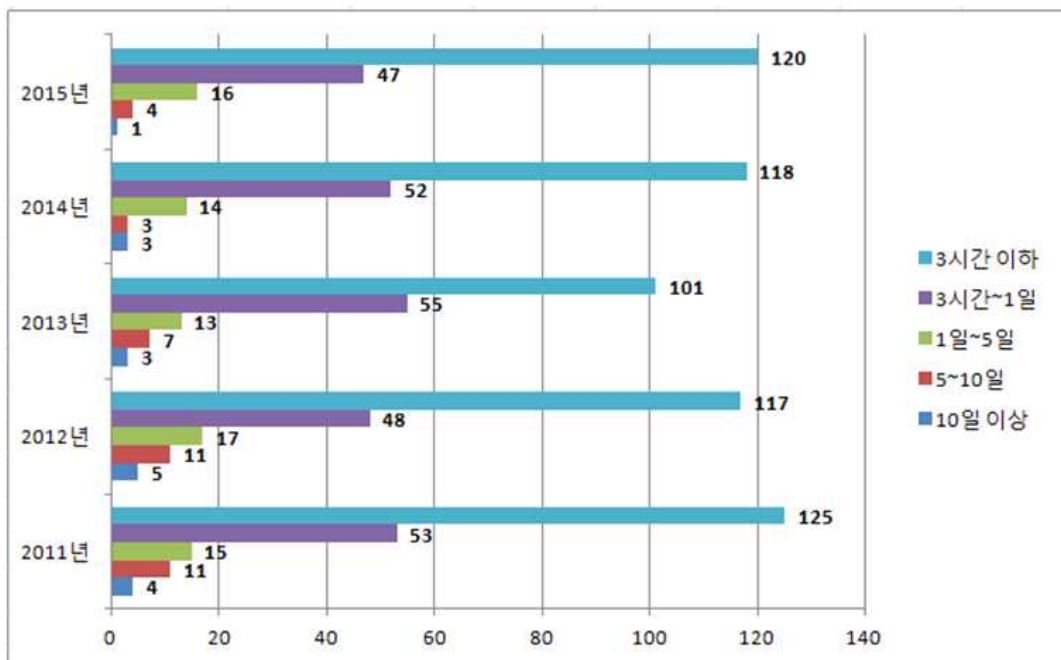


Fig. 7 Annual wind turbine down time at Hankyung wind farm.

연도별 한경풍력 발전단지 고장원인에 대한 세부 분석을 설비별로 나누어 Table 6 과 Fig. 8 에 나타내었다. 기계설비 고장의 경우 사용연수 증가에 따른 노후화로 인해 기어박스 Teeth 및 Yaw brake pad 손상 등 기계설비 부품 손상이 증가하였다. 2013년까지는 증가 추세였으나, Bore scope 점검 등 예방점검을

강화하여 2014년 이후 고장 감소 추세이다.

전기설비 고장의 경우 고장다발 설비는 발전기 Slip ring, Lead wire 등이며, 그 외 차단기 경보 등 중·단기 고장이 복합적으로 발생하였다. 전기설비는 전체 고장의 약 26%를 점유하고 있으나 고장 시간은 기계설비 대비 낮았다. 한편, 제어설비 고장의 경우 순간적으로 높은 풍속에 의한 자동정지, 풍향추종 제어시스템 오류 등 프로그램 문제로 인한 정지가 다수를 차지하였다.

Table 6 The number of annual failure of wind turbine components occurred in Hankyung wind farm.

구 분		'11년	'12년	'13년	'14년	'15년	합 계	점유율 (%)
기 계 설 비	기어박스	6	15	20	15	9	65	8.2
	Yaw Sys.	17	32	20	16	14	99	13.9
	Pitch Sys.	14	29	18	19	13	93	11.7
	Blade & Hub	7	14	21	12	10	64	8.4
	타워 (기초구조물)	2	0	0	0	0	2	0.2
	보조기기	10	9	10	5	8	42	5.3
	소 계	56	99	89	67	54	365	46.0
전기설비 (송전선로포함)		36	19	25	28	27	205	25.9
제어설비 (S/W 포함)		72	43	57	55	66	223	28.1
합 계		164	161	171	150	147	793	100

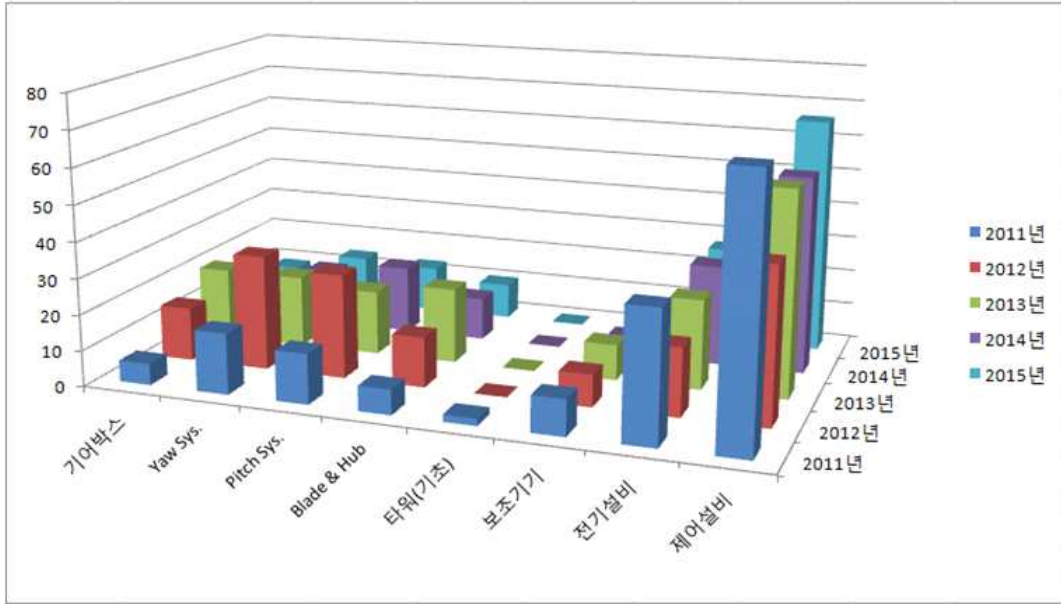


Fig. 8 The number of annual failure of wind turbine components occurred in Hankyung wind farm.

2. 성산풍력 발전단지

2.1 개요 및 설비현황

성산풍력 발전단지는 서귀포시 성산읍 수산리에 위치해 있으며, Fig. 9 와 같이 총 10기의 발전기를 운영 중 이다.

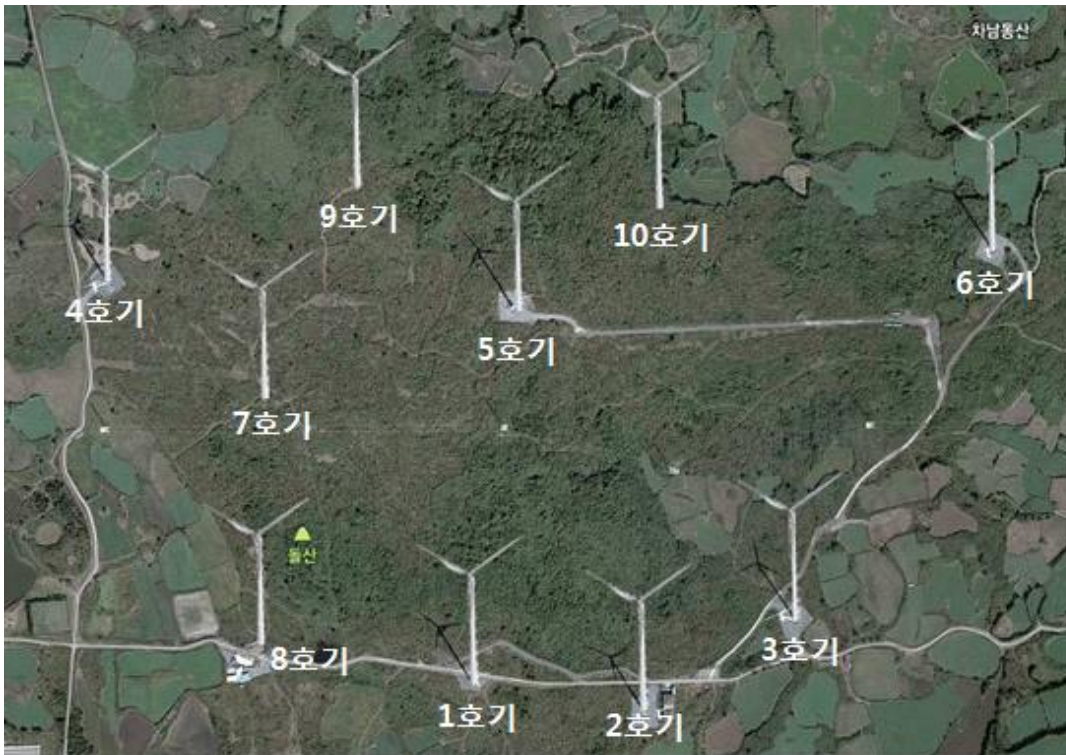


Fig. 9 Layout of Wind turbines in Sungsan wind farm.

성산풍력 발전단지 역시 환경풍력 발전단지와 마찬가지로 준공시점에 따라 1, 2 단계로 나뉘지며, 1단계는 Table 7과 같이 2009년 3월 준공 후 현재까지 운영 중이며 2MW 6기로 총 12MW 용량으로 구성되어 있다. 2단계는 2010년 9월 준공 후 현재까지 운영 중이며, 2MW 4기로 총 8MW 용량으로 구성되어 있다. 제작사는 1, 2 단계 모두 VESTAS사의 V80 기종이다[13].

Table 7 Information of wind turbines installed in Sungsan wind farm.

구 분	설비용량 (단위기×대수)	제작사	준 공
성산풍력 1단계	12MW (2MW×6기)	VESTAS (V80)	'09.03
성산풍력 2단계	8MW (2MW×4기)	VESTAS (V80)	'10.09

2.2 운영실적 분석

Table 8 과 Fig. 10은 성산풍력 발전단지에서의 2011년부터 2015년까지의 가동률, 이용률, 평균풍속, 고장건수 등 운영실적을 나타낸다. 여기서 고장건수는 정지시간 3시간 이내 고장은 제외 한다.

Table 8 Annual operation data of Sungsan wind farm.

구 분	'11년	'12년	'13년	'14년	'15년
가 동 률 (%)	97.3	98.5	98.1	98.6	96.8
이 용 률 (%)	28.4	26.3	26.7	26.2	23.9
평균풍속 (m/s·년)	7.31	7.1	7.28	6.82	6.63
고장건수 (기당)	74 (7.4)	71 (7.1)	81 (8.0)	69 (6.9)	60 (6)

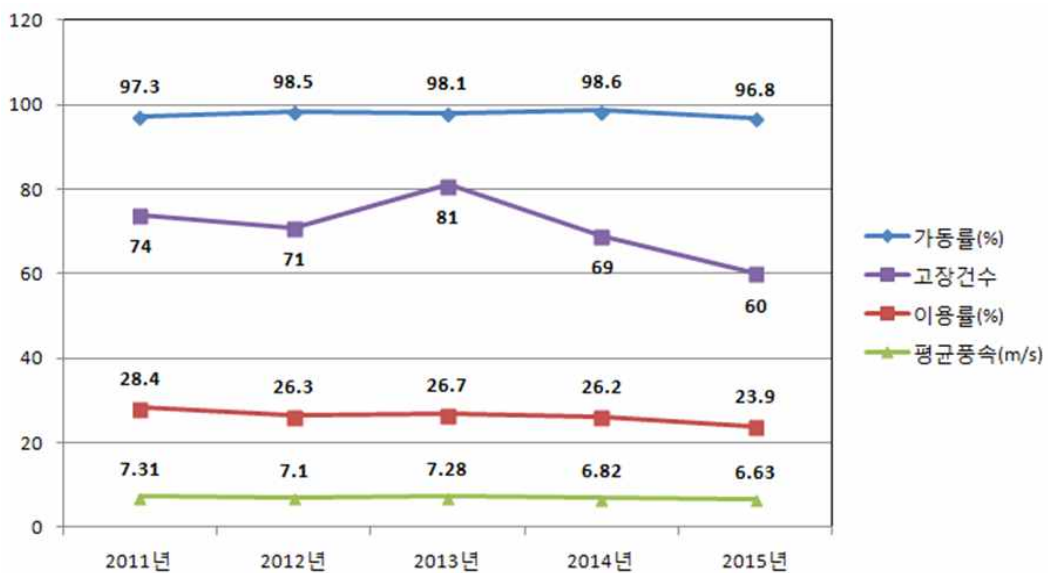


Fig. 10 Annual operation data of Sungsan wind farm.

성산풍력 발전단지의 연도별 가동률은 2011년 기초 손상으로 인해 가동률 일시 저하 후 장기고장 감소로 상승하는 추세이다. 그 후 2015년 변압기 손상으로 가동률이 저하되었다. 이는 성산지역의 해무 및 다습한 기후(연평균 습도 71.4%)로 인하여 변압기 냉각공기가 외부에서 습분 및 이물질 직접 유입되면서 변압기의 절연손상을 유발하였다. 그 후 변압기 전량 절연보강 및 교체작업을 진행하였으며, 변압기 냉각용 공기 공급 시스템을 개선하였다.

성산풍력 발전단지의 연도별 이용률은 평균풍속 감소로 저하되었다. 연도별 고장건수의 경우 매년 감소하고 있다. 연도별 고장건수는 2011년 이후 각 발전기당 연 평균 약 7.3건의 고장이 발생하였다. 2010년 9월 성산풍력 발전단지 2단계 준공 후 초기 고장이 증가하였고 그 이후는 감소하는 추세이다. 2013년에는 제어계통 오류가 빈번하게 발생하여 전년대비 고장이 증가하였으나 중대 고장 감소로 가동률은 0.45% 증가하였다.

2.3 고장현황 분석

Table 9 와 Fig. 11은 성산풍력 발전단지의 연도별 고장 시간에 대한 분석 결과이다. 전체 고장건수는 제작사 하자보증기간 종료시점인 2012년 9월 이후 일시적 증가 후 감소 추세이나 5일 이상의 고장은 정비자재 수급기간 증가 등으로 지속적으로 발생하고 있다.

Table 9 Annual wind turbine down time of Sungsan wind farm.

구 분	'11년	'12년	'13년	'14년	'15년	합 계
10일 이상	4	5	3	3	1	16
5일~10일	11	11	7	3	4	36
1일~5일	15	17	13	14	16	75
3시간~1일	53	48	55	52	47	255
3시간 이하	125	117	101	118	120	581
합 계	208	198	179	190	188	963

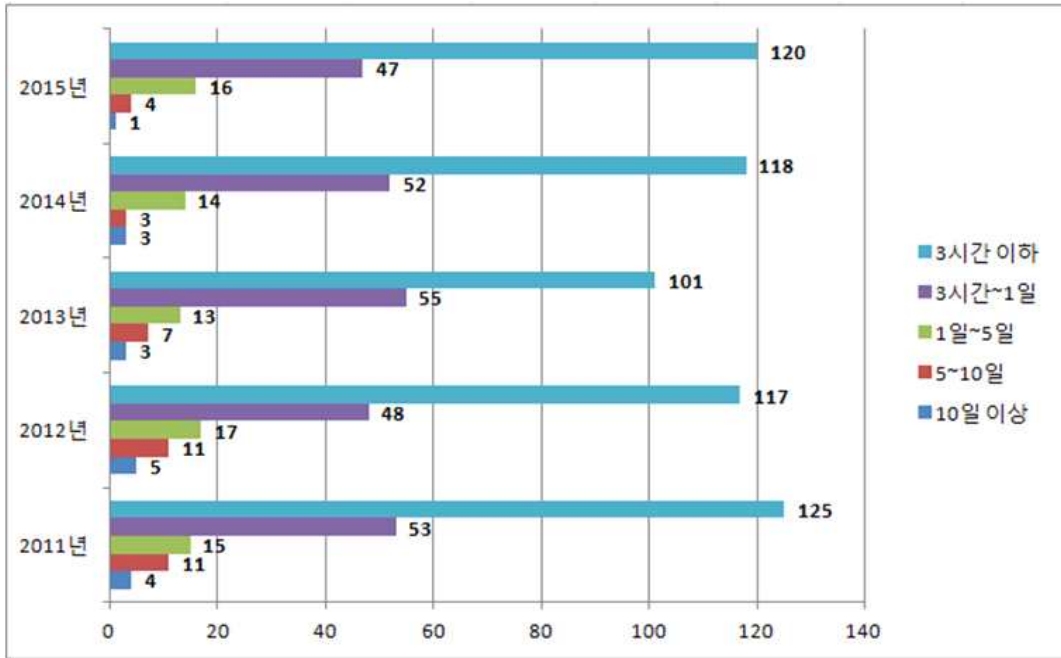


Fig. 11 Annual wind turbine down time of Sungsan wind farm.

연도별 성산풍력 발전단지 고장원인에 대한 세부 분석을 설비별로 나누어 Table 10 과 Fig. 12에 나타내었다.

성산풍력 발전단지 기계설비 고장의 경우 한경풍력 발전단지 대비 고장 비율이 낮음을 알 수 있다. 이는 성산풍력 발전단지의 경우 한경풍력 발전단지에 비해 상대적으로 신규 설비이기 때문이다. 한경풍력 발전단지의 전체 기계설비 고장 점유율은 약 46%이었으나, 성산풍력 발전단지는 약 37.7%이다. 2012년 9월 하자보증기간 종료 후 Yaw system 및 Pitch system과 같은 풍향 추종계통 고장이 증가하였으며, 이것은 한경풍력 발전단지의 기계설비 고장 패턴과 유사함을 보여준다.

전기설비 고장은 준공 초기에 발전기 Slip ring 및 Brush 관련 단발성 고장이 증가하였다. 전체 고장건수 대비 점유율은 약 23.5%로 약 26%인 한경풍력과 유사함을 보인다. 한편, 제어설비 고장의 경우 풍향 추종 Software 오류로 인해 준공초기 제어고장이 빈번하게 발생하였다. 고장점유율은 약 39%로 고장유발 요인 중 가장 높은 비율을 차지함을 알 수 있다. 제어시스템 최적화 노력 및 사전예방 점검을 통해 감소세로 전환되고 있다.

Table 10 The number of annual failure of wind turbine components occurred in Sungsan wind farm.

구 분	'11년	'12년	'13년	'14년	'15년	합 계	점유율 (%)	
기계설비	기어박스	5	12	14	13	12	56	5.7
	Yaw Sys.	7	12	16	19	18	72	7.3
	Pitch Sys.	10	16	15	18	20	79	8.0
	Blade & Hub	6	7	11	10	8	42	4.3
	타워 (기초구조물)	2	0	0	0	0	2	0.2
	보조기기	13	19	30	28	31	121	12.3
	소 계	43	66	86	88	89	372	37.7
전기설비 (송전선로포함)	47	43	57	52	33	232	23.5	
제어설비 (S/W 포함)	87	73	88	69	64	381	38.8	
합 계	177	182	231	209	186	985	100	

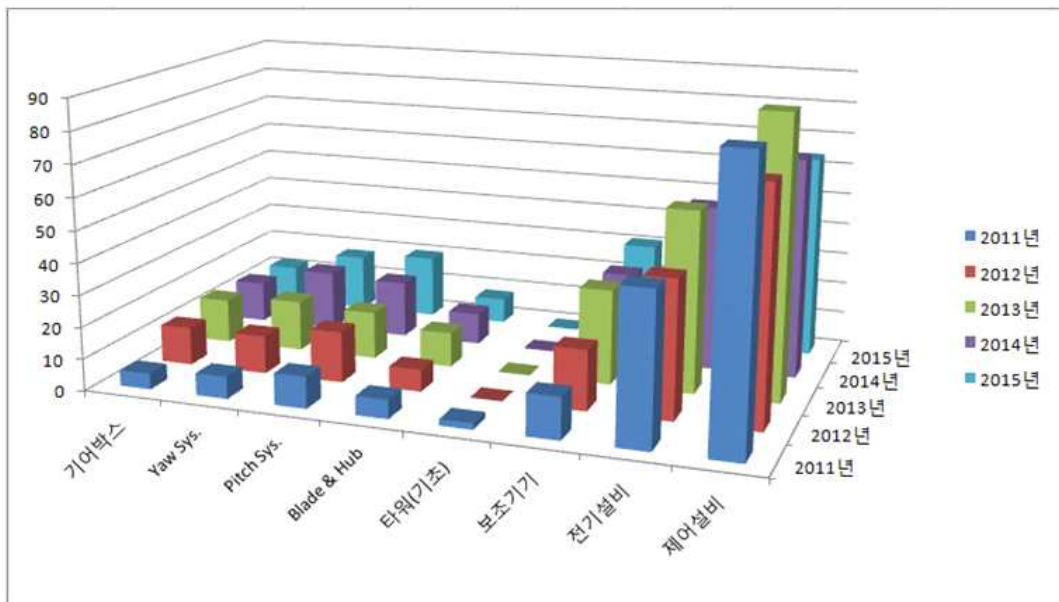


Fig. 12 The number of annual failure of wind turbine components occurred in Sungsan wind farm.

Ⅲ. 상태감시시스템의 O&M 적용을 위한 실제 고장사례 분석

현재 풍력시장에서는 풍력발전기의 대형화 및 해상풍력 진출로 인해 유지보수를 위한 비용이 매년 증가하고 있으며, 경제성 확보를 위해 유지보수 비용을 줄일 수 있는 다양한 대안이 마련되고 있다. 그 중에서 상태감시시스템을 활용한 유지보수가 세계적으로 각광받고 있다. 상태감시시스템의 경우 기계의 진동, 소음, 온도, 오일상태 등 기계의 운전과 관련된 제반조건들을 실시간으로 감시함으로써 고장여부를 사전에 판별할 수 있도록 도움을 준다[14][21].

현재 한경풍력 발전단지 및 성산풍력 발전단지에는 이러한 상태감시시스템이 구축되어 있으나, 유지보수를 위한 부수적인 시스템으로서 제한적으로 사용되고 있다. 아직 상태감시시스템을 도입한지 얼마 지나지 않았기에 실제 유지보수에 적용 가능한 경험 및 기술이 축적되지 못한 상태이다. 이를 극복하고자 본 연구에서는 상태감시시스템, 특히 기계설비의 진동분석을 통한 고장 진단 기술을 적용하고자 한다. 이를 위해 앞서 설명한 고장사례 중 대표적인 4가지 사례에 상태감시시스템을 활용한 고장 진단 기술을 적용하였고, 이 기술의 유효성 및 효율성을 입증하였다[20].

1. 진동분석 방법

상태감시시스템(CMS, Condition Monitoring System)은 풍력발전기의 Main component(터빈 주축, 기어박스, 발전기, 타워 등)의 진동신호를 취득하여 정상 신호들에 대한 통계 처리를 통해 취득된 신호가 결함기준을 초과하는지를 검사할 수 있도록 제반 데이터를 수집하는 장치이다[15]. 상태감시시스템에 의해, 풍력발전기의 모니터 되는 요소 상태의 중요한 변화를 감시하는 것이 가능하게 된다[17]. 여기서 취득된 진동데이터를 분석하는 경우에는 그 방법으로 시간 영역 분석(time domain analysis)과 주파수영역 분석(frequency domain analysis), 이 두 가지 방법으로 나눌 수 있다[16][17].

1.1 시간 영역 분석(Time domain analysis)

시간 영역 분석은 변화하는 실시간의 진동의 진폭(변위, 속도, 가속도 등)을 관측하고 분석하는 방법으로 진동의 진폭을 시간영역으로 산출하여 분석한다. 시간 영역의 데이터는 가속도, 변위 등의 센서 출력의 변화를 시간에 따라 나타낸다. 시간영역 분석은 실효치(RMS, Root Mean Square), 평균값(Mean), 파고율(Crest factor), 첨도(Kurtosis)등의 단순한 산술 계산을 통해 얻은 값들을 이용하여 진동 신호의 경향을 확인할 수 있다.

1.2 주파수 영역 분석(Frequency domain analysis)

주파수 영역 분석이란 시간 영역의 신호를 주파수 영역의 신호로 변화하여 각 주파수 마다의 주파수 대역별로 분해하여 표시하는 방법을 말한다. 주파수 영역 분석은 신호를 주파수로 변환하여 분석하므로, 기계 진동에 대한 이상원인 파악을 위한 진단에는 보다 적합한 방법이라고 할 수 있다[15][22].

시간적으로 연속하여 측정되는 신호파형을 FFT(Fast Fourier Transform)로 분석하기 위해서는 어느 유한 시간길이 T 동안의 파형 데이터는 시간 폭 Δt 마다 이산적으로 샘플링되고, 그 시점마다의 값을 계산할 시에 DFT인 경우, 표본점들의 개수 N 을 N^2 으로 변형을 해야 되고 표본점 사이의 간격이 일정할 시에 계산 시간을 줄이기 위해서 N 을 $M \log N$ 으로 변형하여 FFT를 수행한다[16][17].

2. 상태감시시스템 설치 위치

Table 10과 Fig. 13 은 환경풍력 발전단지 및 성산풍력 발전단지에 설치된 상태감시시스템 센서의 위치를 보여준다. 총 11가지의 센서가 설치되어 있으며, 풍력발전기의 주요설비인 Gear Box, Generator, Tower 등에 설치되어 주요 요소별 진동 감시가 가능하다. 일반 가속도 센서는 Gear box intermediate stage front 등 6곳에 설치되어 있으며, 저주파용 가속도 센서는 Gear box 1st planetary stage, Tower 등에 설치되어 저속 회전부 진동 신호 측정용으로 사용된다. 속도 센서의 경우 Generator Shaft에 설치되어 회전수(RPM: Revolution Per Minute) 측정용으로 사용된다[18][19][25].

Table 11 Location of vibration sensors.

CH (Position)	Component description		Sensor type
1	Gear Box 1st Planetary Stage		가속도(저주파)
2	Gear Box 2nd Planetary Stage		가속도(저주파)
3	Gear Box Intermediate Stage Front		가속도
4	Gear Box Intermediate Stage Rear		가속도
5	Gear Box High Speed Stage Front		가속도
6	Gear Box High Speed Stage Rear		가속도
7	Generator Front		가속도
8	Generator Rear		가속도
9	Generator Shaft		속도
10	Tower	Axial	가속도(저주파)
11		Transversal	가속도(저주파)

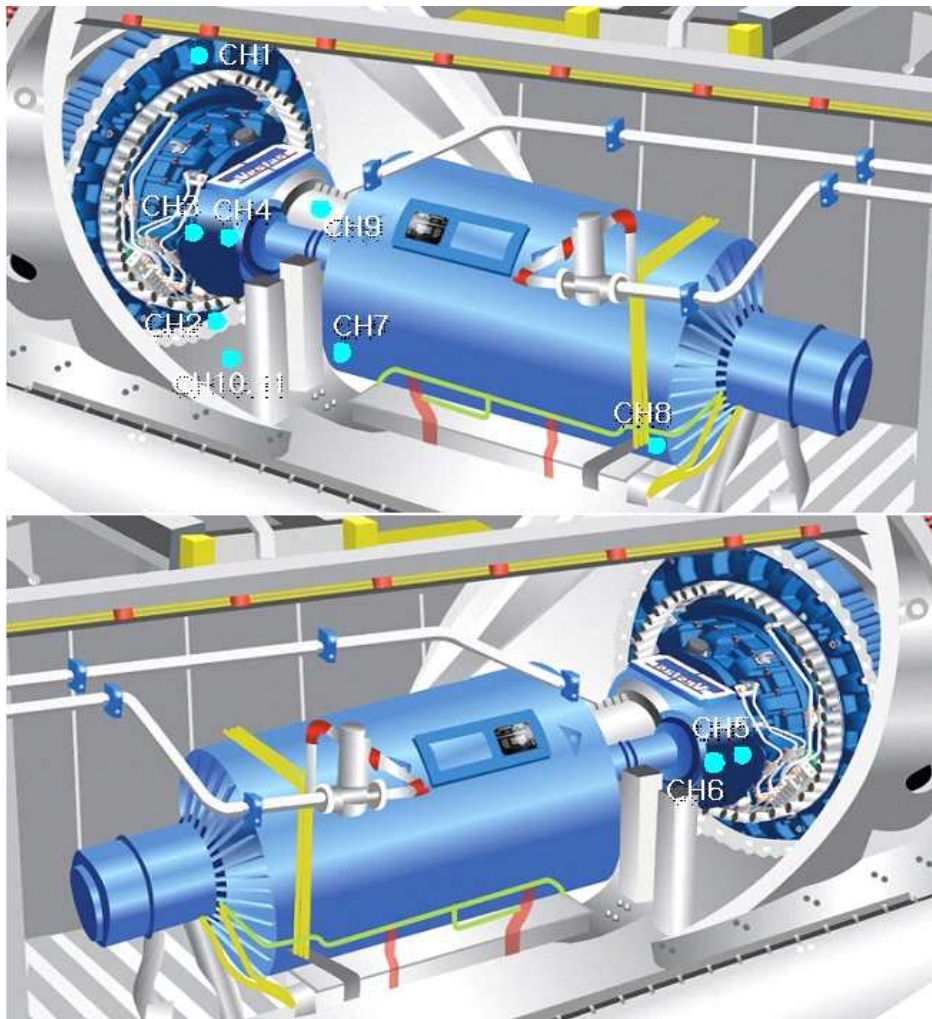


Fig. 13 Location of vibration sensors.

본 연구의 경우 위에서 설명한 센서 중 Fig. 14와 같이 Generator front 및 Generator rear에 설치되어 있는 고주파용 가속도 센서의 검출 데이터를 바탕으로 2013년부터 2015년까지의 유지보수 기록 중 4가지 케이스를 선정하여 데이터 분석 및 연구를 시행하였다[26].

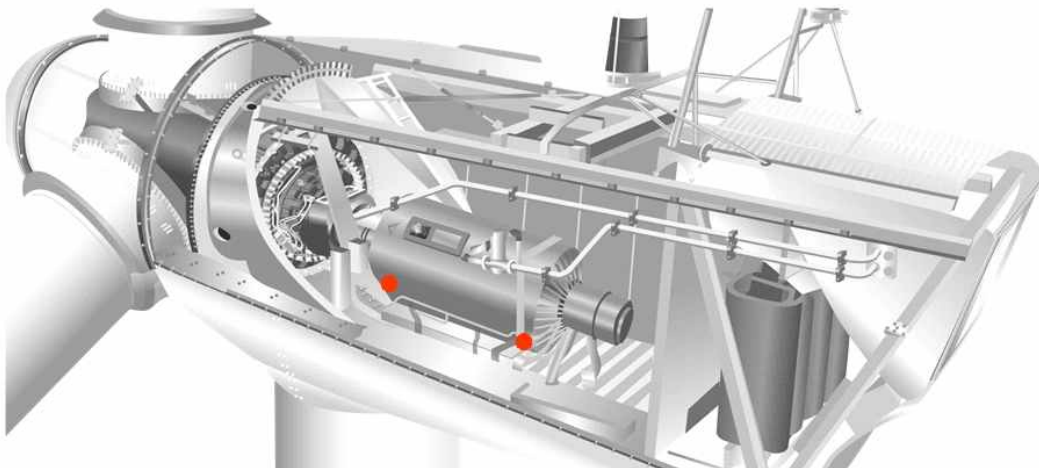


Fig. 14 Vibration sensors used for vibration analysis.

3. 유지보수 사례 분석

3.1 한경풍력 발전단지 A호기 발전기 교체

3.1.1 고장사례

첫 번째 유지보수 사례는 한경풍력 발전단지 NM72C A호기 발전기 교체 사례이다. 2015년 1월 7일 고장발생 및 발전기가 정지되어 교체 준비기간을 거쳐 1월 18일 발전기 교체를 시행하였고, 1월 21일 시운전 및 발전기 기동을 완료하였다. 설비고장 당시 정격 1,500kW 운전 중 Grid spike L2, Grid drop voltage L1, Main CB1 Tripped alarm이 동시에 발생하며 정지되었다. Table 12와 Fig. 15는 실제로 정비인력이 현장에 투입되어 발전기를 점검한 결과이다.

Table 12 Inspection report on generator
 (Site: 'A' WT of Hankyung wind farm, Date: 2015-01-07).

발전기				케이블	
절연저항(MΩ)		코일저항(mΩ)		절연저항(MΩ)	
U-GR	∞	U	2	U-GR	∞
V-GR	0	V	2	V-GR	∞
W-GR	0	W	2	W-GR	∞

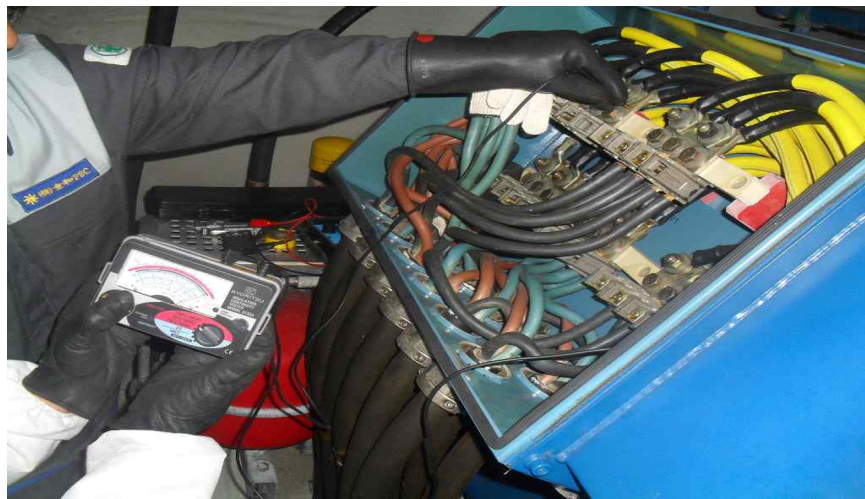


Fig 15. Measurement of insulation resistance of generator
 (Site: 'A' WT of Hankyung wind farm, Date:2015-01-07)

Table 12에서 보면 발전기 V상, W상의 절연이 파괴된 상태이며 이는 고정자 권선 지락 사고로 그 원인이 밝혀졌다. 이것은 풍력발전기 너셀 내부 밀폐 구조 특성상 고온 환경, 회전자 냉각팬에 의한 발전기 내부 미세먼지 유입, 전기충격에 의한 절연재 열화 등이 세부 원인으로 분석된다.

Fig. 16은 발전기 교체공정 사진이다. 작업순서는 너셀 내부 설비 분리작업 및 발전기 전력케이블 결선 분리 → 너셀 커버 분리 → 발전기 취외 → 발전기 취부 → 너셀 커버 취부 → 전력케이블 연결의 순서로 진행되었다.

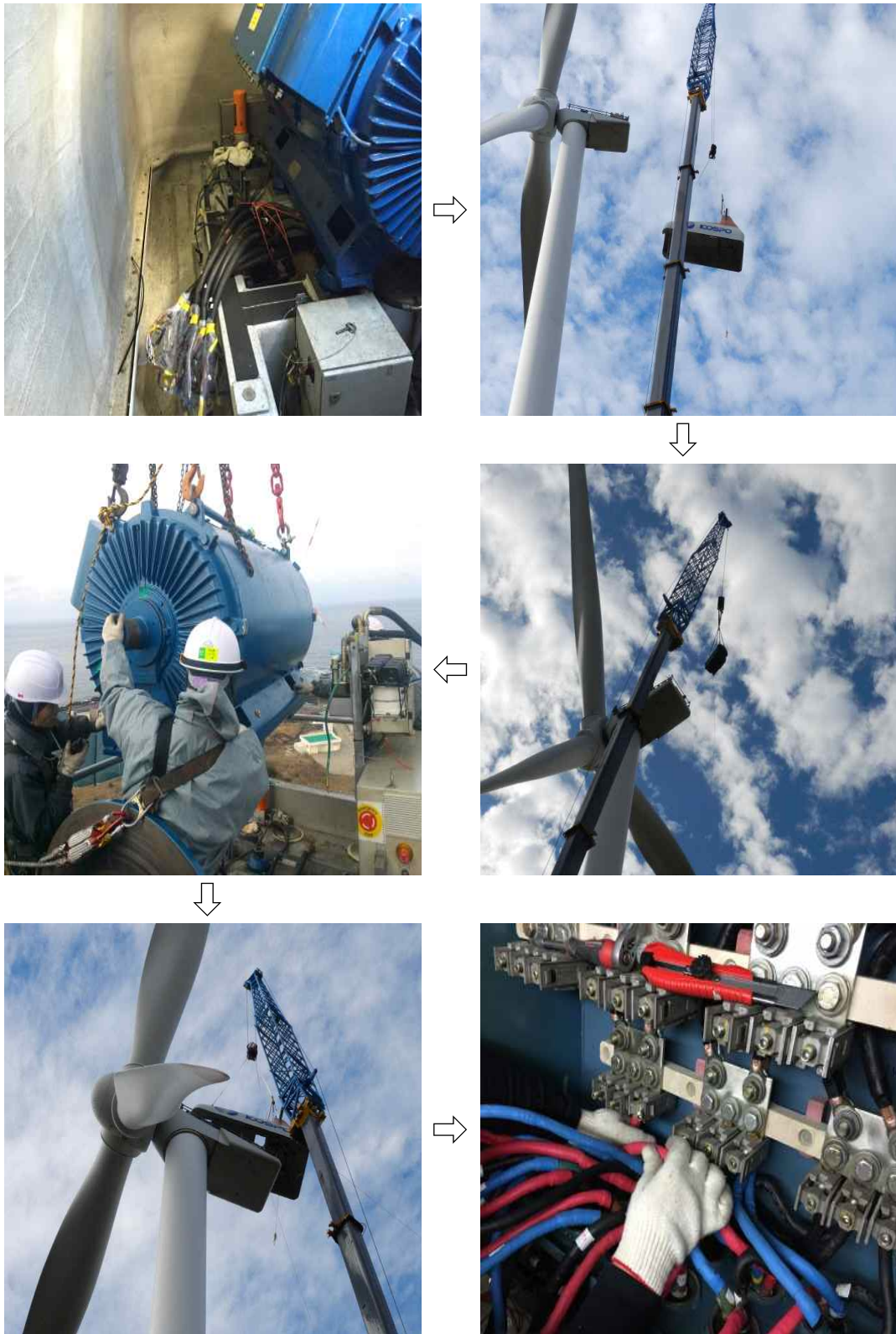


Fig 16. The process for replacement of the broken generator
 (Site: 'A' WT of Hankyung wind farm, Date:2015-01-18).

3.1.2 상태감시시스템을 활용한 고장 진단

한경풍력 A호기 발전기 고장사례에 상태감시시스템을 활용한 고장 진단 기술을 적용하기 위해 발전기 권선에서 측정된 온도 데이터와 발전기 뒷단(Generator rear)에서 측정된 진동 데이터를 분석하였다. 고장 시점 전·후 데이터를 분석하였으며, 이를 통해 온도 및 진동이 어떤 경향을 보이는지 파악하였다.

Fig. 17은 발전기 권선 온도그래프이다. 교체 전과 후의 온도가 확연히 다를 수 있다.

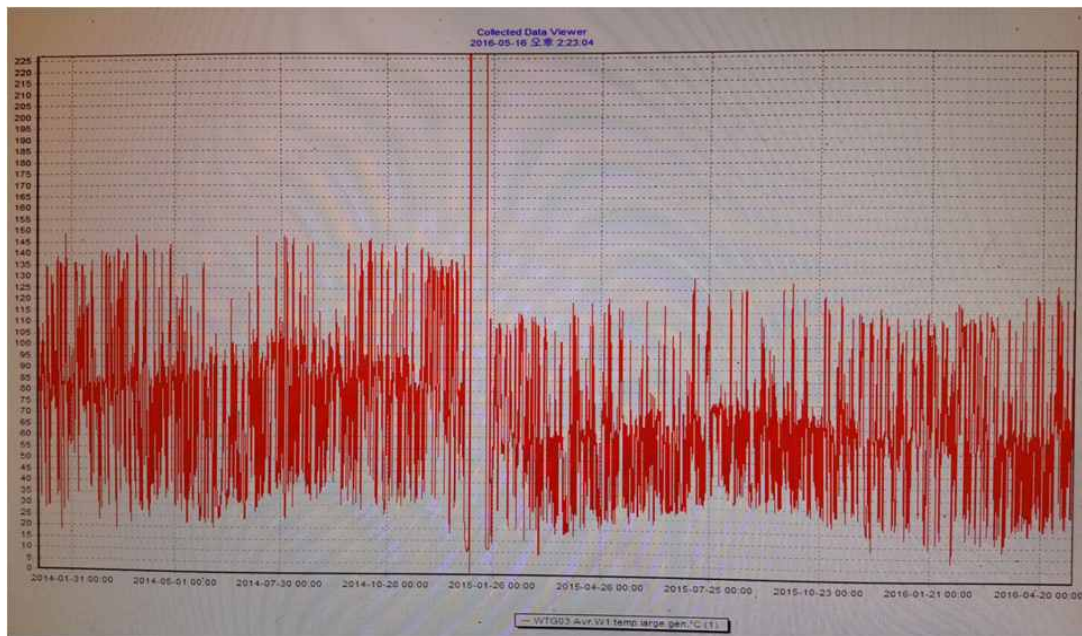


Fig 17. Temperature variation measured at the winding of generator (Site: 'A' WT of Hankyung wind farm).

Table 13은 한경풍력 발전단지의 A호기 발전기 고장 시, 동기간동안 동일 기종의 타 발전기와 비교한 운전온도 데이터이다. 타 호기에 비해 해당 호기의 발전기 권선의 온도 및 베어링의 온도가 높은 상태임을 알 수 있다. 이로서 온도의 경우 발전기 고장을 파악하는데 있어 효과적인 진단 파라미터가 될 수 있음을 알 수 있다. 하지만 온도의 경우 고장원인을 파악하는데 한계가 있다. 어디가 고장이 났는지를 알아야 적절한 유지보수를 할 수 있으므로 온도 데이터만을 활용한 상태감시는 한계가 있다. 그러므로 이를 보완하기 위해서는 진동분석 역시 같이 수반되어야 한다.

Table 13. Comparison of operating temperature in the generators
(Site : Hankyung 1st wind farm, Date:2015-01-07).

구 분	A호기	B호기	C호기	D호기
Gen' Winding (한계운전온도: 155℃)	141℃	113℃	107℃	125℃
Gen' Brg Front (한계운전온도: 100℃)	91℃	80℃	76℃	84℃
Gen' Brg Rear (한계운전온도: 100℃)	85℃	76℃	68℃	89℃
Water Before Cooler	50℃	53℃	43℃	38℃
Water After Cooler	38℃	42℃	23℃	26℃

Fig. 18과 19는 한경풍력 발전단지 A호기 발전기 뒷단(NDE: Non Drive End)진동분석 결과를 보여준다. Fig. 18의 경우 진동분석 중 시간영역 분석 결과를 보여준다. 세로축은 측정된 진동 가속도의 RMS(Root Mean Square)값이며, 가로축은 시간이다. 2014년 3월경부터 진동이 증가하고 있음을 알 수 있으며, 이 후 발전기 교체가 이루어진 시점인 2015년 1월 이후 부터는 진동이 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 2014년 3월부터 고장이 발생한 것으로 보인다.

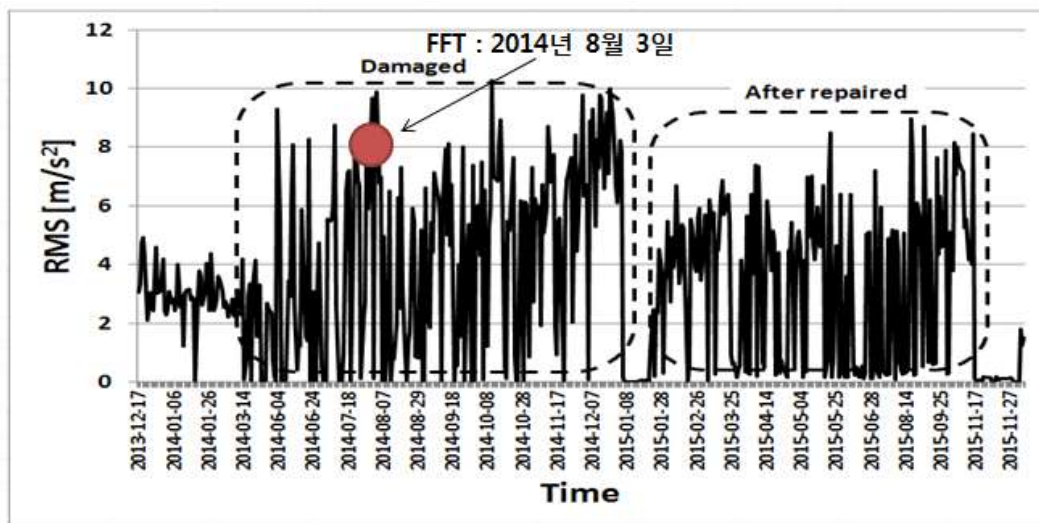


Fig 18. Time domain analysis for vibration signals measured on the generator NDE (Site: 'A' WT of Hankyung wind farm).

Fig. 19의 경우 진동분석 중 주파수영역 분석 결과를 보여준다. 2014년 8월 3일에 측정된 1초 샘플링 데이터를 토대로 FFT분석을 통해 얻어진 그래프이다. 진동의 주파수영역 분석의 경우 고장원인을 파악하는데 있어 효율적인 진단법이라고 익히 알려져 있다. 본 연구에서는 이 주파수영역 분석을 통해 실제 고장이 어디서 일어났는지 파악하고자 한다.

이 사례의 경우 1800Hz와 2480Hz에서 높은 가속도 값의 진동이 관측되었는데, 분석결과 1800Hz의 경우 coil passing frequency 이며, 2480Hz의 경우 rotor bar passing frequency이다. Rotor bar passing frequency는 고정자(stator) slot수에 회전주파수를 곱한 주파수인데, 이 영역대의 진동값이 높을 경우 발전기 로터 바의 돌출이나 절손 등을 의심해 볼 수 있다. Rotor bar passing frequency는 로터 바 손상으로 인해 발생하는 언밸런스한 진동이기 때문이다. 하지만 단순 로터 바 손상으로서는 coil passing frequency가 뛰는 현상을 설명할 수 없다. 이는 단순 로터 바 손상이 아닌 발전기 코일에 문제가 있는 것으로 보인다. 그리고 실제 유지 보수 결과 발전기 코일이 타 버렸음이 확인되었다. 즉, 발전기 코일이 타 버려서 자기장이 불균일하게 형성되었고 이로 인해 자기장 축과 발전기 로터 축이 서로 일치하지 않아서 편심이 생겼다. 그리고 이로 인해 rotor bar passing frequency 영역의 진동이 나타난 것으로 생각된다.

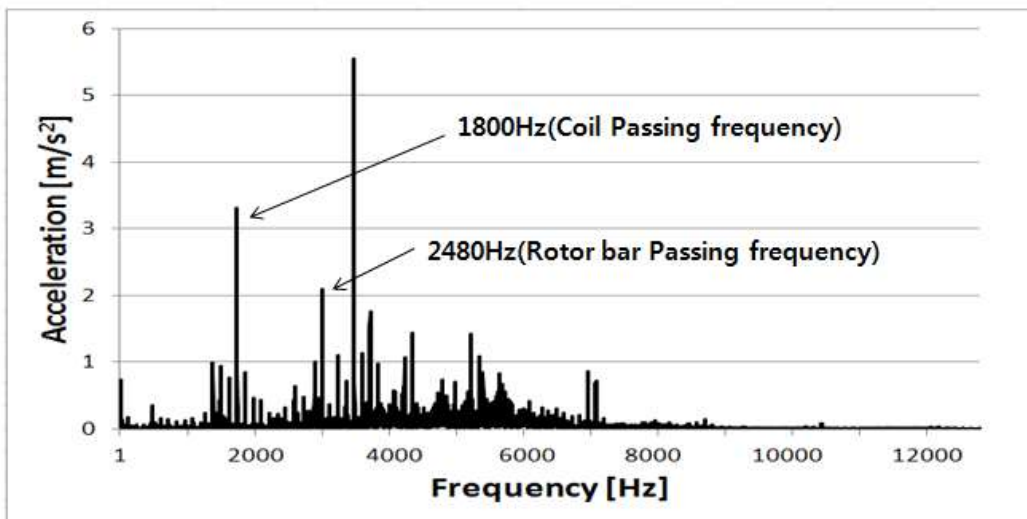


Fig 19. Frequency domain analysis for vibration signals measured on the generator NDE (Site: 'A' WT of Hankyung wind farm, Date: 2014-08-03).

3.2. 한경풍력 발전단지 B호기 발전기 베어링 교체

3.2.1 고장사례

두 번째 유지보수 사례는 한경풍력 발전단지 NM72C B호기 발전기 베어링 (DE:6326/C3, NDE:6324/C3)이 고착되어 교체한 사례이다. 2014년 9월 15일 고장 발생 및 발전기가 정지되어 교체 준비기간을 거쳐 9월 17일~18일 양일간 발전기 베어링 교체를 시행하였고, 9월 19일 시운전 및 발전기 기동을 완료하였다. 설비고장 발생 당시 풍속은 5m/s였으며, 저풍속 구간이어서 발전출력은 없는 상황이었다. 총 작업기간은 6일이 소요되었으며, 정비인원은 4명이 투입되었다. 고장의 원인은 Fig. 20과 같이 Bearing과 Generator shaft의 용착으로 판명됐다.



Fig 20. Generator rotor self-welded
(Site: 'B' WT of Hankyung wind farm, Date:2014-09-15).

교체공정은 Fig. 21과 같이 Generator Bearing Seal 분리 → Generator Cover 분리 → Generator Bearing 교체 → Generator Cover 및 Bearing Seal 조립 → Generator & Gear Box Shaft Alignment 측정 → Coupling 조립으로 진행되었다.



Fig. 21 The process for replacement of the broken generator bearings
 (Site: 'B' WT of Hankyung wind farm, Date: 2014-09-15~19).

3.2.2 상태감시시스템을 활용한 고장 진단

Table 14는 B호기 발전기 고장 시, 동기간 동안 동일기종의 타 호기와 비교한 발전기와 기어박스의 진동 레벨이다. 여기서 DE(Drive End)는 앞단, NDE(Non Drive End)는 뒷단을 의미하며, LSS(Low speed shaft)는 저속축, HSS(High speed shaft)는 고속축을 의미한다. 분석결과 한경풍력 4호기 발전기 앞단(DE)과 뒷단(NDE)의 진동레벨이 확연히 높음을 알 수 있다. 이로서 고장위치가 발전기 임을 의심해볼 수 있다. 정확한 고장원인의 경우 주파수영역 분석을 통해 확인할 수가 있으며, 이는 뒤에서 제시하였다.

Table 14 Comparison of vibration levels of generators and gear boxes
(Site: Hankyung 1st wind farm, Date: 2014-09-15).

구 분[m/s ²]		A호기	B호기	C호기	D호기
발전기	DE	9.6	19.0	8.2	2.9
	NDE	3.7	27.8	5.4	7.4
기어박스	LSS Front	3.5	2.4	4.1	2.7
	HSS Front	1.8	4.9	2.6	4.2

Fig. 22는 한경풍력 B호기 발전기 뒷단 진동분석 결과를 보여준다. Fig. 22의 경우 진동분석 중 시간영역 분석 결과를 보여준다. 2014년 6월경부터 진동이 증가하고 있음을 알 수 있으며, 이 후 발전기 베어링 교체가 이루어진 2014년 9월 16일 이후부터는 진동이 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 2014년 6월부터 고장이 발생한 것으로 생각된다.

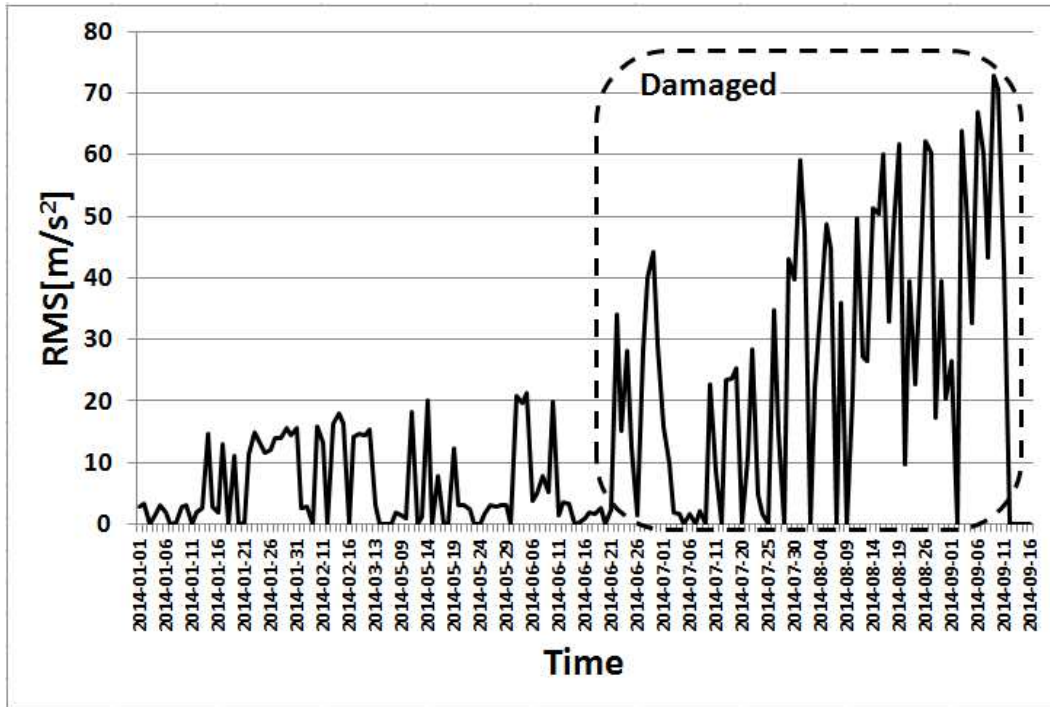


Fig 22. Time domain analysis for vibration signals measured on generator NDE (Site: 'B' WT of Hankyung wind farm).

고장기간 중 2014년 9월 8일에 취득한 진동데이터에 대한 FFT분석을 수행하였고, 그 결과 베어링 내륜 결함 주파수 영역(156Hz)의 진동신호가 검출되었다. 이 결과는 Table 15에서 자세히 설명하였다. 내륜 결함 주파수의 경우 측정된 진동의 진폭 값이 2m/s^2 (1배수 성분), 1.8m/s^2 (2배수 성분)에 해당하는 높은 수치를 보여 베어링 고장을 의심해 볼 수 있었다. 실제로 베어링 교체 후 그 진폭 값이 1배수 및 2배수 성분 모두 0.1m/s^2 으로 감소하였다.

Table 15 Enveloped FFT at generator NDE
 (Site: 'B' WT of Hankyung wind farm, Date: 2014-09-08).

결함주파수 종류	고장 시		고장 후(베어링 교체 후)	
	주파수 범위[Hz]	진폭 값[m/s ²]	주파수 범위[Hz]	진폭 값[m/s ²]
Inner ring x1	156	2	156	0.1
Inner ring x2	330	1.8	330	0.1

3.3 성산풍력 발전단지 C호기 발전기 베어링 교체

3.3.1 고장사례

세 번째로는 성산풍력 발전단지 V80 C호기 유지보수 사례를 분석하였다. 2014년 7월부터 발전기 온도가 상승하고 있음을 온도데이터를 통해 주시하고 있던 중 2014년 7월 30일 High Temp. Gen. Bearing(NDE) Alarm이 발생하였다. 이것은 발전기 Non-Drive End 측의 온도 범위가 높음을 의미하여, Fig. 23과 같이 발전기 온도센서, 냉각팬, Auto Grease Pump 점검을 시행하였다. 점검결과 관련 설비는 이상 없었다.

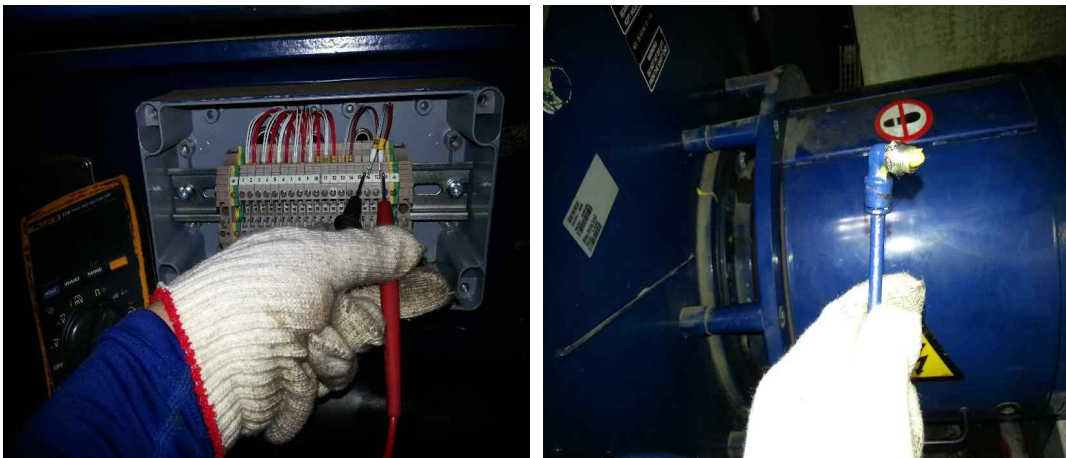


Fig 23. Generator bearing temperature sensor inspection(Left)
 Auto grease pump inspection(Right).

그러나 그 이후 2014년 9월 발전기 베어링 이음이 확인되었고, 2014년 10월 1일에는 High gear temp alarm 발생(91℃)으로 Fig. 24와 같이 Thermal relay 점검, Nacelle fan 및 Motor를 점검하여 Nacelle fan 및 Motor의 파손을 확인 하였다. 이와 더불어 Motor를 고정하는 Bracket 역시 파손이 되었음을 확인하여 정상화 및 교체 작업을 시행하였다.



Fig 24. Thermal relay inspection(Left) / Broken nacelle fan(Right).

발전기 온도상승을 해결하고자 위와 같은 점검 및 교체작업을 시행하였으나 발전기 베어링의 온도 상승이 지속되는 현상이 나타나 계획예방 정비 차원의 발전기 베어링 교체 계획을 세워 2015년 3월 12일 교체를 시행하였다.

교체공정은 Fig. 25와 같이 Generator Slip Ring Frame, 및 Generator Bearing Seal 분리 → Generator Cover 분리 → Generator Rotor Internal Lead Wire 보강 및 Generator Bearing 교체 → Generator Cover 및 Bearing Seal 조립 → Generator Slip Ring 및 Coupling 조립 → Frame 조립으로 진행되었다.

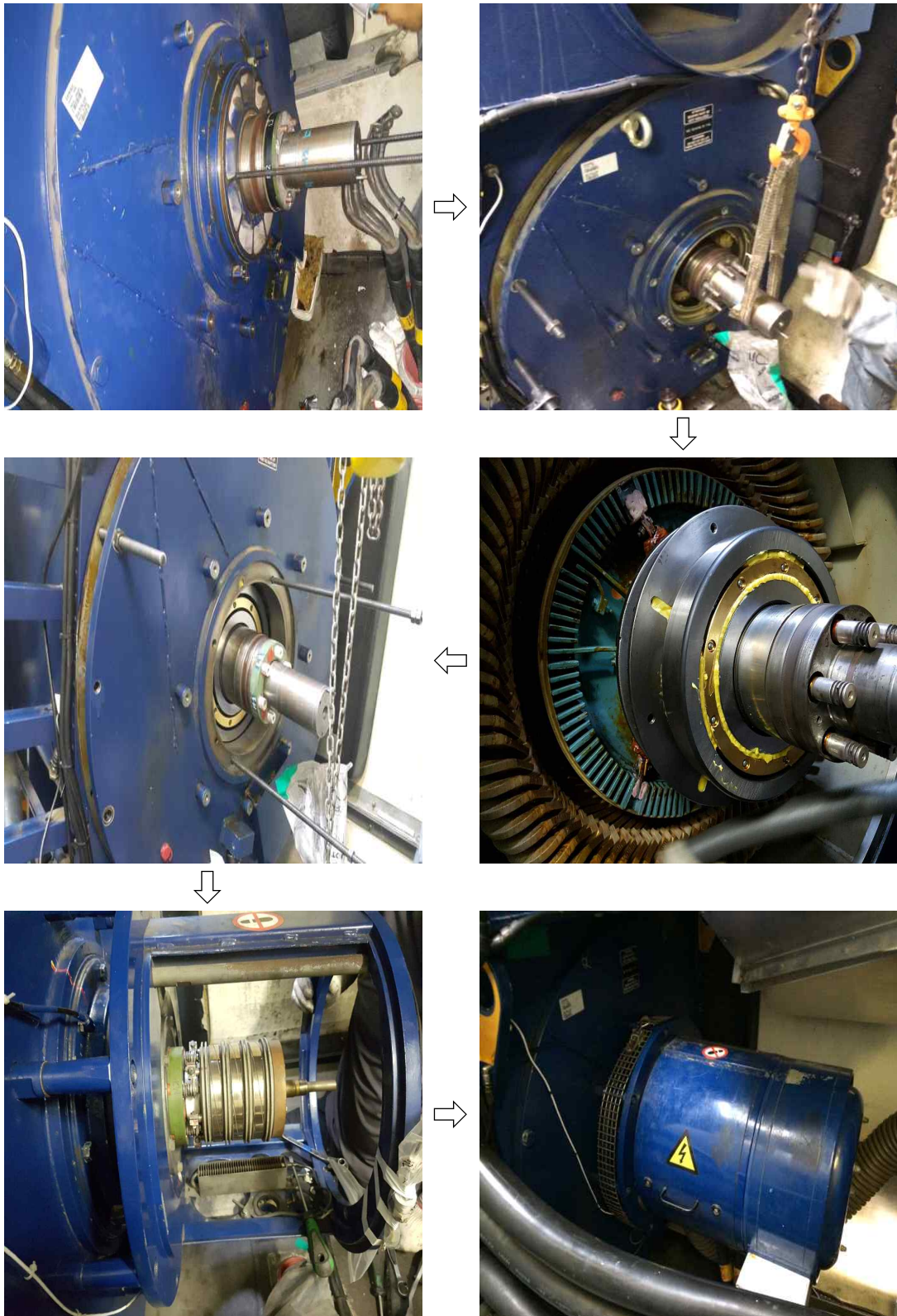


Fig. 25 The process for replacement of the broken generator bearings
 (Site: 'C' WT of Sungsan wind farm, Date:2015-03-12~19).

3.3.2 상태감시시스템을 활용한 고장 진단

Fig. 26과 27은 성산풍력 C호기 발전기 앞단(DE) 진동분석 결과를 보여준다. Fig. 26의 경우 진동분석 중 시간영역 분석 결과를 보여준다. 2014년 10월 중순부터 진동이 증가하고 있음을 알 수 있으며, 이 후 발전기 베어링 점검 및 교체가 이루어진 2015년 3월 12일 이후부터는 진동이 감소하고 있는 것을 알 수 있다. 2014년 11월부터 고장이 의심된다.

Fig. 27은 진동분석 중 주파수영역 분석 결과를 보여준다. 2015년 2월 9일에 측정된 1초 샘플링 데이터를 토대로 FFT분석을 실시했다. 3,000Hz 초반 영역에서 높은 가속도 값을 보이는데 이 주파수영역은 발전기 베어링의 고유진동수 성분이라 판단된다. 이 베어링 고유진동수가 관찰이 된 이유는 발전기 회전축과 베어링 사이에 직접적인 충격에 가까운 접촉이 일어나 베어링의 자려진동이 일어났기 때문이다. 실제 유지보수 기록을 보면 2014년 10월 1일 Nacelle fan 및 Motor, Bracket의 파손을 확인 하였는데 이것은 발전기의 비정상적인 진동이 위 부품에 영향을 미친것이라 판단된다. 그 후 발전기 베어링 교체작업을 통해 위와 같은 진동이 사라졌다. Fig. 28은 수리 후 2015년 5월 10일경의 FFT분석 결과이다. 이 그래프에서 실제로 3,000Hz 초반의 베어링 고유주파수 성분의 진동이 눈에 띄게 감소한 것을 알 수 있다.

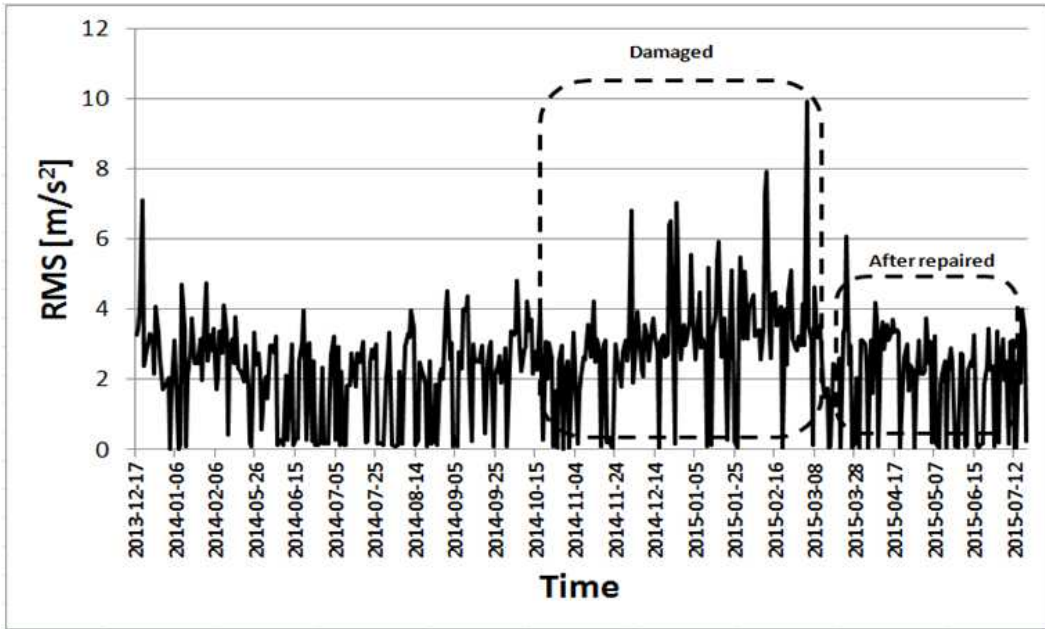


Fig 26. Time domain analysis for vibration signals measured on generator DE (Site: 'C' WT of Sungsan wind farm).

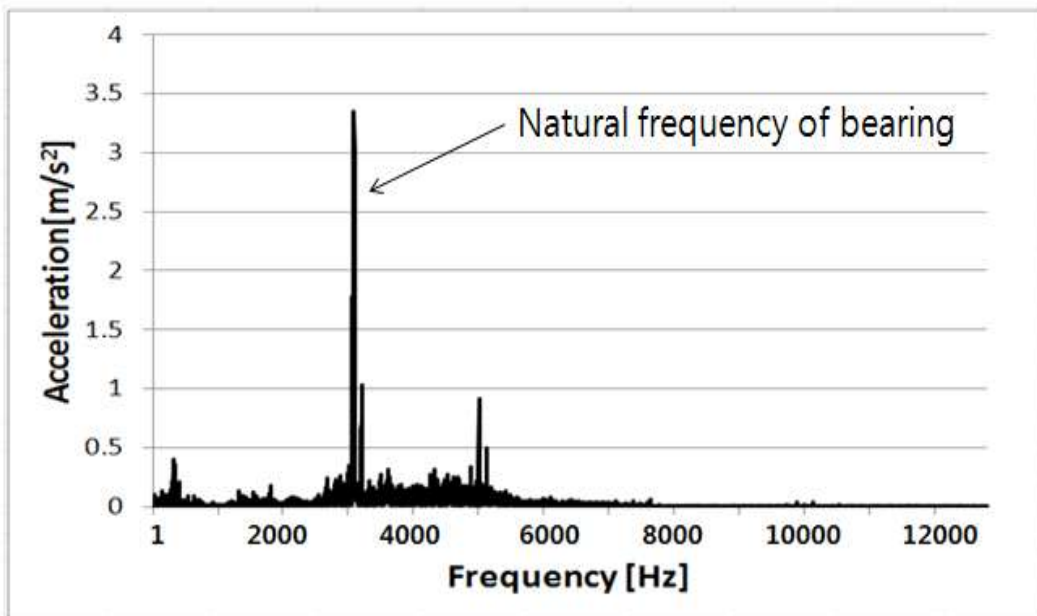


Fig 27. Frequency domain analysis for vibration signals measured on generator DE (Site: 'C' WT of Sungsan wind farm, Date: 2015-02-09).

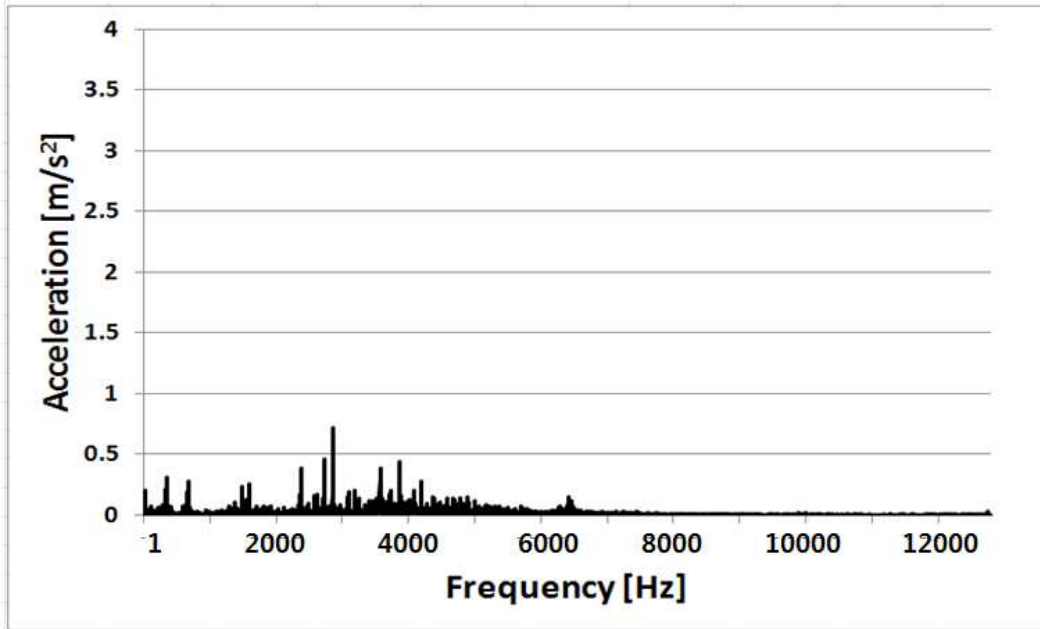


Fig 28. Frequency domain analysis after repairing oil leak
(Site: 'C' WT of Sungsan wind farm, Date: 2015-05-10).

3.4 성산풍력 발전단지 D호기 발전기 냉각팬 점검

3.4.1 고장사례

마지막으로 성산풍력 D호기 유지보수 사례를 분석하였다. 2015년 10월 6일 Generator cooling fan이 정상 작동하지 않아 현장 점검을 시행하였다. 우선 Generator colling fan motor의 인가전압을 측정하여 690V로 양호함을 확인하였고, Motor의 절연저항을 측정하여 500MΩ의 양호한 측정 결과를 확인하였다. 그 다음 Motor의 코일저항을 측정하여 Table 16 과 같이 양호한 결과를 확인하였다.

Table 16. Generator cooling fan motor coil resistance.

구 분	코일저항		
Low	U1-V1	U1-W1	V1-W1
	11.5Ω	11.5Ω	11.5Ω
High	U2-V2	U2-W2	V2-W2
	97.8Ω	97.4Ω	97.5Ω

그 후 Thermal relay를 점검하여 Setting 값을 점검하였다. 점검결과 3.3A가 확인되었고 성산풍력 나머지 발전기들의 Setting 값은 3.6A와 맞지 않아 Fig. 29와 같이 3.3A에서 3.6A로 변경하였다.



Fig 29. Change of the thermal relay current value.

3.4.2 상태감시시스템을 활용한 고장 진단

Fig. 30과 31은 성산풍력 D호기 발전기 뒷단(NDE) 진동분석 결과를 보여준다. Fig. 30의 경우 진동분석 중 시간영역 분석 결과를 보여준다. 꾸준히 높은 진동 가속도값을 보이다가 수리가 이루어진 2015년 10월 6일 이후부터는 진동이 감소하고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 31은 진동분석 중 주파수영역 분석 결과를 보여준다. 2015년 2월 9일에 측정된 1초 샘플링 데이터를 토대로 FFT분석을 실시했다. FFT 분석 결과 전체적인 주파수 범위에서 높은 진동 가속도 값이 관찰되고 있다. 이는 발전기 냉각팬(Cooling fan)에 이상이 발생하여 냉각효과가 충분히 발생하지 않아서 이로 인해 발생한 결과로 판단된다. 발전기의 열이 외부로 잘 빠져나가지 못해 발전기 및 그 주변기기 등의 온도가 상승하게 되었고 발전기 코일에 부하가 발생하여 자기장이 불안정 해졌다.

또한 Rotor의 열굽힘에 의한 진동변화가 동반되었고 이로 인하여 전체적인 주파수 범위에서 가속도 진폭이 상승하였다. 실제로 냉각팬의 Thermal relay의

Setting을 수정하여 정상적으로 냉각팬이 작동되게 한 이후부터는 위와 같은 진동이 감소하였다. Fig. 32는 냉각팬 수리 후 2015년 12월 21일경에 측정된 진동 데이터의 FFT 분석 결과이다. 수리 전의 그래프와 비교하여 진동이 많이 줄어들었음을 확인할 수 있다.

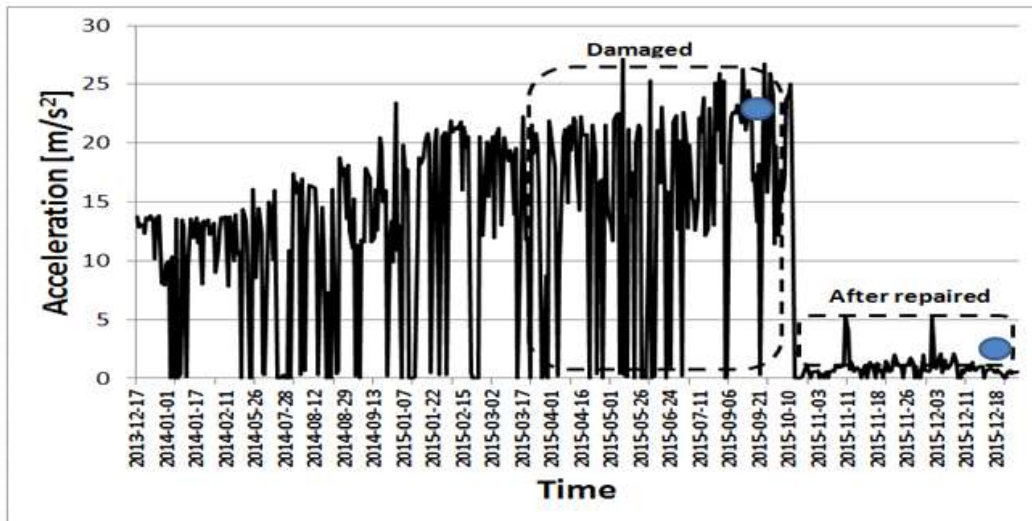


Fig 30. Time domain analysis for vibration signals measured on generator NDE (Site: 'D' WT of Sungsan wind farm).

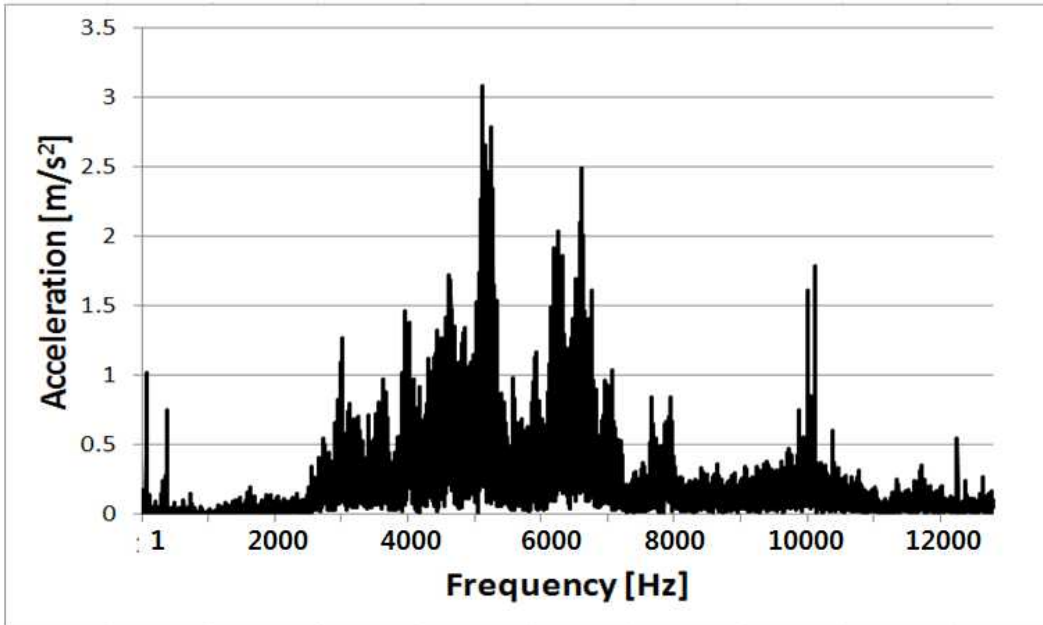


Fig 31. Frequency domain analysis for vibration signals measured on generator NDE (Site: 'D' WT of Sungsan wind farm, Date: 2015-02-09).

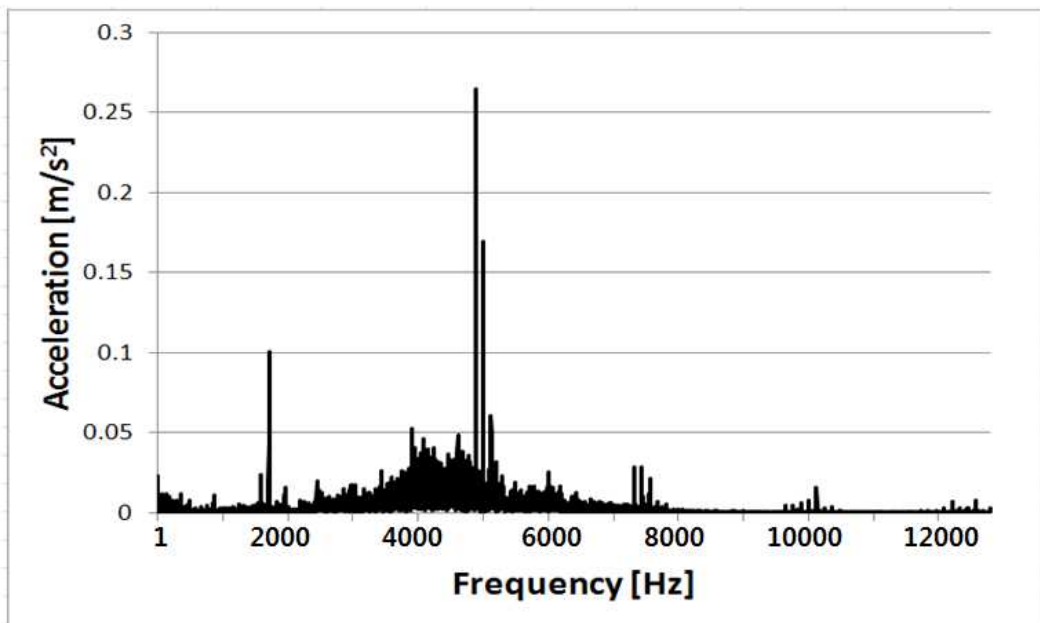


Fig 32. Frequency domain analysis after repairing generator cooling fan (Site: 'D' WT of Sungsan wind farm, Date: 2015-12-21).

VI. 결 론

본 연구에서는 한경 및 성산풍력단지의 유지보수 기록을 고장 유형별로 분석하였다. 그 다음 고장사례 중 대표적인 4가지 사례에 상태감시시스템을 활용한 고장 진단 기술을 적용하여, 이 기술의 유효성을 입증하였고, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 한경풍력단지 및 성산풍력단지의 유지보수 기록을 분석하였다. 한경풍력의 가동률은 상승하는 추세이며, 분석기간 동안 연평균 풍속 저하로 인해 이용률은 감소하는 추세였다. 이러한 연평균 풍속은 시간이 지남에 따라 다시 높아질 것으로 생각된다. 정비능력 향상으로 장기간 고장은 감소하였으며, 전기·제어설비 노후화에 따른 단기간 고장 점유율은 높았다.
- (2) 성산풍력단지의 가동률은 상승하는 추세에서 2015년 변압기 손상으로 저하되었다. 한경풍력단지와 마찬가지로 분석기간 동안 연평균 풍속 저하로 인해 이용률은 감소하는 추세였다. 고장건수는 2011년에서 2013년 까지 증가하는 추세였으나, 그 후 2015년까지 다시 감소하였다. 이것은 준공초기에 제어시스템 고장이 빈번하게 발생하였으나 최적화 노력 및 사전예방 점검을 통하여 개선되었기 때문으로 분석된다.
- (3) 대표적인 4가지의 유지보수 사례를 통해 상태감시시스템을 활용한 고장 진단을 수행하였다. 한경풍력 3호기 발전기 고장사례 분석의 경우 진동 가속도의 RMS값을 통해 고장 9개월 전부터 진동이 증가하고 있음을 알 수 있었고, FFT분석을 통해 발전기 권선에 문제가 있음을 확인할 수 있었다. 한경풍력 4호기의 경우 발전기 베어링 고장 3개월 전부터 진동이 증가하였고, FFT 분석을 통해 베어링 고장을 알 수 있었다. 성산풍력의 2가지 유지보수 사례에서도 진동분석, FFT 분석 결과 유압펌프 및 발전기 냉각팬의 고장발생을 알 수 있었다.
- (4) 이와 같은 분석을 통해 상태감시시스템을 설치하여 발전설비고장의 사전 진단·예측진단이 가능함을 알 수 있었고, 고장 진단기술을 적절히 활용한다면 향후 풍력발전설비의 효율적·안정적 운영에 도움이 될 것이라 생각된다.

참고문헌

- [1] 김상민, “풍력발전시장 중국, 미국, 독일이 전세계 풍력발전 용량 61% 차지”, 미래한국, 2016
- [2] Wind Power Journal, 2016
- [3] GLOBAL CUMULATIVE INSTALLED WIND CAPACITY 2000-2015, Global wind report, GWEC 2015
- [4] 고정만, “陸上風力發電團地の 防災管理 매뉴얼 開發을 위한 方案”, 제주대학교 산업대학원, 2016.
- [5] 한국풍력산업협회, www.kweia.or.kr.
- [6] 고경남, 강문중, 허종철 “행원풍력발전단지에서 풍력발전시스템의 운전특성”, 한국태양에너지학회 논문집, 2007.
- [7] 허관구. “고장사례 분석을 통한 제주 풍력발전 단지운영 개선방안. 2016
- [8] 김태완. “風力發電機 故障 趨勢 分析”, 제주대학교 산업대학원, 2016
- [9] 제주특별자치도, “제주형 저탄소 녹색성장 Cabon Free Island Jeju by 2030”, 2012.05.
- [10] Condition Monitoring of Offshore Wind Farms(CONMOW), Final Report, ECN-E07-044, 2007.
- [11] 신동현, “나셀풍속을 이용한 풍력터빈의 성능저하 분석”, 제주대학교 대학원, 2015.
- [12] 양달승, “환경, 성산풍력 단지 개발 및 운영사례와 향후 발전 방향”, Wind Energy Asia 2015, Conference & Exhibition.
- [13] 이창협, “제주지역 풍력발전단지의 에너지저장시스템 운영 및 수익증대 방안에 관한 연구”, 제주대학교 산업대학원, 2016.
- [14] 김남형, 고경남, 양순보 “해상풍력발전”, 씨아이알, 2015.
- [15] 김상렬, 김봉기, 김영기, 이준신, 박준영. (2012.4). “풍력발전기 상태감시를 위한 진동 측정신호 분석방법에 대한 고찰”. 한국소음진동공학회 학술대회논문집, , 261-262.

- [16] 이경현, 2012년, "시간영역과 주파수영역을 통합한 풍력발전기 베어링의 결함진단기법," 제주대학교
- [17] 최병성, "Fourier의 해석," Im 시리즈, pp. 37.
- [18] Zijun Zang, "Wind turbine vibration study : a data driven methodology"
- [19] Diego Coronado, "Condition monitoring of wind turbines: state of the art, user experience and recommendations" p7
- [20] 양보석, "ISO 규격에 따른 기계설비의 상태감시와 진단," 일본진동기술연구회, pp. 89.
- [21] 고경남, 허종철, "풍력공학입문", 문운당, 2006.
- [22] Donna K. Dawson, "Big Blades Cut Wind Energy Cost," Composites Technology, Feb. 2003.
- [23] 산업통상자원부, "제4차 신재생에너지 기본계획", 2014.
- [24] 제주특별자치도, "제주특별자치도 풍력발전 종합관리계획", 2012.
- [25] 풍력발전시스템의 기술 기준 Technical Guidelines for Wind Turbines, Korea Register.
- [26] "State of the Art Report, Condition Monitoring for Wind Turbines," UPWIND Project Report, 2007.

감사의글

설레는 마음으로 입학한지 2년 반이 흘러 석사학위 논문 완성을 앞두고 있는 지금이 믿기지 않을 정도로 주마등처럼 빠르게 지나갔습니다. 석사학위를 취득하기까지 힘들고 어려웠던 순간들을 이겨내며, 제 인생의 큰 전환점이 되었습니다.

먼저 배움의 길을 마련해준 한국남부발전(주) 임직원 분들에게 감사드립니다. 저희 풍력운영부의 김태완 부장님, 이기남 차장님, 이충기 과장님, 석현, 창협, 성원이 우리 식구들의 많은 배려와 응원이 있었기에 석사과정을 무사히 마칠 수 있었습니다. 감사합니다.

5학기 동안 많은 가르침을 주신 고경남 지도교수님 진심으로 감사드립니다. 교수님의 가르침으로 풍력공학 지식의 폭을 넓힐 수 있었고, 석사 학위 논문 완성을 할 수 있었습니다. 더불어 가르침 주신 허종철 교수님, 김범석 교수님, 김세호 교수님, 양경부 선생님 감사합니다.

영원히 함께하기로 다짐한 우리 동기 분들 큰형님이신 고승훈 센터장님, 정만이 형, 창협이 우리 동기들 덕분에 좋은 추억 많이 만들었고 즐거웠습니다.

논문작성을 하며 정말 많은 도움을 주신 단지설계연구실 강동범 박사과정, 손진혁 석사과정 두 분께 정말 감사하다는 말을 전하고 싶습니다. 늦은 밤과 주말을 마다하고 제 논문에 아낌없는 조언을 해주셔서, 저의 논문의 품격을 높이고 완성할 수 있었습니다. 또한 학교에 갈 때마다 따뜻하게 맞아주셨던 단지설계 연구실 모든 분들에게도 감사의 말씀을 전합니다.

항상 전적으로 지원해주시고 용기주시고 지켜봐주신 아버지와 어머니 정말 감사합니다. 학창시절 기대만큼의 성과가 나오지 않아 항상 죄송한 마음이 있었지만, 이번 석사학위 논문 완성으로 뿌듯함을 느끼실 것 같아 늦게나마 작은 효도를 한 것 같습니다. 또한 장남인 저 보다 집안일을 챙기고 도맡아 했던 동생 지영이에게 항상 미안하고 고맙다는 제 마음을 전하고 싶습니다.

논문 작성의 중간 중간마다 많은 격려를 해주신 예비 장인, 장모님께도 감사합니다. 논문을 작성하는 이번 학기에는 결혼이라는 제 인생의 중대사를 앞두고 있었습니다. 이렇게 결혼준비와 논문작성을 같이해야하는 상황이라 예비신부에게

결혼준비의 큰 짐을 혼자 짊어지게 하였습니다. 이제 며칠 뒤면 제 아내가 될 임지현 에게 준비에 소홀했던 미안함과 감사의 말을 전합니다.

석사학위 취득을 위해 노력했던 2년 반이라는 시간이 앞으로 저의 인생의 훌륭한 버팀목이 될 것으로 확신하며, 몸담고 있는 회사의 발전을 위해, 더 나아가 대한민국의 풍력발전산업 발전에 기여할 수 있는 구성원이 될 수 있도록 더욱 정진하겠습니다.

감사합니다.

2016년 12월

부 대 원 올림