

풍력발전기의 사고 발생요인의 분류

A Classification on the Causes of Wind Turbine Accidents

김귀식* · 정지현***
Gui-Shik Kim* and Ji-Hyun Jeong***

(Received 15 June 2015, Revision received 04 August 2015, Accepted 05 August 2015)

Abstract: The production of electricity from wind energy is noticed as economic power generation system in the natural resource. Lately, since lots of wind turbine have installed globally, the accidents have increased gradually. In this paper, we classified domestic information for 10 years, information of new energy and industrial technology development organization(NEDO) for 4years and caithness windfarms information forum(CWIF) for 15 years according to part and cause of wind turbine accident . We found that the main causes of accidents are storm, lightening and carelessness. The results of classifying and analyzing the informations, should be used to take measures on the accident prevention of wind turbine.

Key Words : Wind turbine, Natural resource, CWIF, Accident prevention

1. 서 론

풍력발전은 이산화탄소를 배출하지 않는 저탄소 녹색성장 산업의 일환으로 추진하고 있는 무공해 에너지로 각종 신재생에너지 중에서 경제성이 높은 에너지원으로 주목받고 있다. 우리나라에서 풍력발전은 1988년부터 시작되어 그 이후 국내 여러 곳에 풍력발전단지가 조성되어 최근 가동 중인 풍력발전기의 발전용량은 403,263kW (2011년 12월 기준)로 보고되고 있다.¹⁾

풍력발전기는 대표적인 피로한계 구조물이다. 불규칙한 자연의 바람을 받아서 발전을 하여야 하므로 블레이드는 가볍고, 고도가 높아야 풍속이 크므로 길이가 길어야 하고, 낙뢰, 얼음, 폭풍 등 극한 조건하에서 가동된다. 블레이드는 보통

25rpm의 회전속도로 일년에 수백만회 회전하며, 비행기가 이륙하는데 필요한 힘과 같은 크기를 가진 바람이 충돌하게 된다. 블레이드의 길이는 보잉 747기의 날개 길이와 비슷하고, 상공을 운행하는 비행기와 달리 풍력발전기는 대지와 가깝게 건설되므로 강력한 난류가 존재한다. 따라서 이러한 가혹한 운전조건은 블레이드에 피로균열이 발생할 수 있다. 특히 대부분의 블레이드 소재는 경량화 및 비 강성 등의 이유로 GFRP로 만들어져 있으므로 피로에 취약하다.

또한, 풍력발전기는 날개를 천천히 돌려 빠르게 전기를 생산하도록 하기 위한 동력전달장치로서 기어박스가 필요하다. 기어박스는 발전타워의 끝에 설치된 무거운 장치로 항상 고장이 발생할 가능성이 높다. 풍력발전기의 피로누적과 연관된 가

*** 정지현(교신저자) : 제주대학교 기계공학전공
E-mail : badaro@jejunu.ac.kr, Tel : 064-754-3627

* 김귀식 : 제주대학교 기계공학전공

*** Ji-Hyun Jeong(corresponding author) : Major of Mechanical Engineering, Jeju National University.
E-mail : badaro@jejunu.ac.kr, Tel : 064-754-3627

* Gui-Shik Kim : Major of Mechanical Engineering, Jeju National University.

장 중요한 부품은 날개와 기어박스이다.

특히, 풍력발전기는 풍향조건이 양호한 산 정상 부근과 해안선 가까이에 설치하는 경우가 많고, 풍력발전기 자체도 블레이드가 회전하여 풍력발전시설의 가장 높은 위치에 있으므로 낙뢰피해, 부식 등의 자연재해로 인한 사고가 많이 발생할 수 있어서, 기술적인 면에서는 설치후의 품질관리의 문제, 고장에의 대응, 유지보수의 대책 등이 필요하다.

풍력발전은 청정 녹색에너지원이지만 터빈과 풍차의 날개가 고장나거나 사고가 날 경우 그 위험은 예측할 수 없게 된다. 그리고 풍력발전 사업의 활성화를 위해서 풍력발전기의 이용가능성과 설비 이용률의 향상이 필요하므로, 이를 위하여 풍력발전설비의 운전상황과 고장 및 사고에 관한 실태에 관한 정보의 수집하여 체계적인 대책을 마련해야 함에도 불구하고 부분적으로 사고 및 고장사례를 파악하고 있을 뿐이다.²⁾

본 연구는 2001년에서 2010년까지의 국내 풍력발전기 사고자료 및 일본의 신에너지·산업기술 종합 개발기구(NEDO)에서 발표한 2004년에서 2007년까지 풍력발전기 고장 및 사고를 조사한 자료와, 스코틀랜드의 Caithness주에서 개최되는 Caithness Windfarms Information Forum(CWIF)에서 발표된 세계의 풍력발전단지에서 발생한 비교적 큰 규모의 사고에 대하여 2000년부터 2014년까지 정리된 풍력발전기 사고 유형을 종류별, 연대별로 분류되어 정리한 것이다.

최근 국내에서도 풍력발전단지들이 조성되고 있으므로 이 자료를 바탕으로 풍력발전단지에서 발생하는 사고와 고장에 대해 유형을 분류하고, 피해사례를 분석함으로써 풍력발전시설의 사고 및 고장에 대한 대책을 수립하기 위한 자료가 되고, 더 나아가서는 풍력발전시설의 유지 및 보수의 표준화 방안의 구상에 도움이 될 것이다.

2. 고장 및 사고의 유형

2.1 국내의 경우

2011년 지식경제부(현 산업통상자원부)가 보고

Table 1 Main accidents of domestic wind turbine

Location	Power (kw)	Manufacturer	Date	Cause
Pyeongchang	2,640	vestas	2010	gear box, generator
Yeongwol	2,250	unison	2010	lightning
Ulleung	600	vestas	2000	connection
Taebaek	6,800	gamesa	2010	yaw gear, converter
		gamesa	2010	cooler, converter
		vestas	2010	communication
jeju	9,800	vestas	2009	control panel
		vestas	2010	fire

한 최근 10년간(2001~2010년)의 국내 풍력발전기 주요 사고 및 고장¹⁾을 Table 1에 나타내었다. 이 기간 중 국내 풍력발전기의 사고(또는 정지) 건수는 24건에 달하며, 고장으로 풍력발전기를 완전히 철거한 경우도 2건이나 있었다.

사고 및 고장의 원인은 기어박스 및 제너레이터 고장, 낙뢰에 의한 변압기 및 발전기 소손, 한전 계통연계 불안정, 요 기어 파손 및 컨버터 불량, 오일쿨러 파손 및 컨버터 불량, 상하부 통신불량, 하부 컨트롤 패널 고장, 너셀 화재 발생 등이다. 전문기술자가 없어서 정기적인 유지관리가 어렵고, 외국산이라서 부품조달 및 제조회사 기술자의 방문도 용이하지 않아서 재가동하는 데는 많은 시간이 걸리고 있는 실정이다.

2.2 NEDO의 경우

2004년에서 2008년 3월까지 4년간 조사 대상 풍력발전기 수는 3,618 대로 고장 및 사고발생은 445회였다.³⁾ 여기에 제시하는 풍력발전기의 고장 및 사고의 정의는 풍력발전기가 무엇인가의 트러블에 의해 3일(72시간) 이상을 정지한 경우로서 풍력발전시설외부의 계통고장에 의해 정지한 경우도 포함된 것이다.

2.2.1 고장 및 사고발생 원인 및 내역

Table 2에 나타낸 것처럼 고장 및 사고요인은

Table 2 Main accident category from NEDO

Accident classification	Cause	Number		Frequency(%)
Natural disaster	lightening	94	133	30
	storm	22		
	turbulent	4		
	ice throw	4		
	other	9		
Structural issue	design fault	55	111	25
	construction fault	11		
	manufacture fault	45		
Human issue	maintenance fault	10	10	2
System issue	system failure	4	4	1
other issue	unknown	169	187	42
	other	18		
Total		445		

자연현상 30%, 풍력발전기 고장 25%. 인적요인 2%, 계통고장 1% 및 기타 42%이었다.

발생 내역은 자연현상에서 폭풍 5%, 낙뢰 21%, 난류 1%, 동결 1%, 그 외 2% 이었다. 풍력발전기 고장에서는 설계불량 12%, 제조불량 10%, 시공불량 2%이었다. 기타 내역 중에서 원인불명은 38%, 그 외 기타 4%이었다.

낙뢰는 블레이드와 제어장치의 고장이 많은데, 특히 블레이드 고장의 80%가 낙뢰에 의한 것이었다. 원인불명은 여러 부위에서 나타난 고장으로 피치제어장치, 발전기, 제어장치, 전기장치 및 유압장치 등으로 고장 발생빈도가 비교적 많다. 설계불량은 풍향풍속계의 고장, 주축·베어링, 발전기의 고장발생회수도 비교적 많다. 제조불량은 제어장치, 전기장치, 외장재 등의 고장이 많고, 폭풍에서는 내풍속 설계기준을 초과한 풍속에서 파손된 풍향풍속계의 사례가 많다.

2.2.2 사고 부위별 발생회수와 평균정지시간

사고발생 부위별로 정리하여 Table 3에 나타내었다. 발생회수가 많은 고장부위는 풍향풍속계 67건, 제어장치 61건, 블레이드 52건, 전기장치 41건, 피치제어장치 36건의 순이다. 발생부위별 평균정지시간은 블레이드 1,606 hr/회, 주축·베어링

1,619 hr/회, 기어박스 1,467 hr/회, 발전기 2,209 hr/회, 요 장치 2,401 hr/회, 센서 1,522 hr/회, 전기장치 974 hr/회, 제어장치 658 hr/회로서, 고장사고 발생회수가 많으면 정지시간이 길어져서 이용 가능성이 저하한다. 발생회수가 적어도 정지시간이 긴 부위 즉, 블레이드, 요제어, 발전기, 주축·베어링, 기어박스 등도 이용 가능성을 저하시킨다.

Table 3 Main accident parts from NEDO

Accident part	Number	Frequency (%)
Anemovane	67	15
Control unit	61	14
Blade	52	12
Electric device	41	9
Pitch control device	36	8
Generator	30	7
Hydraulic device	20	4
Sensor	13	3
Gear box	10	2
Shaft & Bearing	8	2
Brake device	7	2
Other	100	22
Total	445	100

2.3 CWIF의 경우

풍력발전기에서 발생한 사고 데이터는 Fig. 1에 나타난 것처럼 2000년부터 2014년까지 15년간 총 1,443건에 대한 자료이다.⁴⁾ 상기 기간 동안 발생한 사고에 대해 유형별로 정리하여 Table 4에 나타내었다. 그중에서 가장 많은 빈도수를 차지한 것은 블레이드의 손상(19%)이고, 다음으로 인명사고(18%), 구조적손상(10%), 화재(9%) 등의 순이다. 이러한 사고에 대하여 사고원인과 발생부위를 확인해 본다.

2.3.1 블레이드 고장 및 손상

풍력발전기 사고에서 가장 빈도가 높은 것은 블레이드 부분이다. 블레이드는 길이가 긴 고속 회전체로서 풍력발전기에서 가장 중요한 설비중의 하나이다. 블레이드의 손상이 발생한 경우 공력성 저하로 인한 발전 성능이 저하하고 안전사고에 의한 피해가 발생한다. Table 5에 나타난 것처럼 블레이드 손상의 원인 중 가장 빈도수가 높은 것이 폭풍 및 강풍(27%)이다. 강풍은 블레이드의 과속운동과 진동발생을 유발하고 발전기 등의 기계적 손상과 컨트롤 시스템 고장의 원인이 된다. 또한 강풍은 먼지 및 모래, 나뭇가지 등의 이물질을 동반하기 때문에 블레이드의 표면 마모나 손상을 초래한다. 따라서 강풍에 의해 블레이드의 표면이나 일부분이 떨어져 나가 근처 도로나 인가 등에 피해를 입히는 사고가 지속적으로 발생하고 있다.

그 다음으로 높은 빈도수를 차지하는 것이 낙뢰(18%)에 의한 블레이드 손상이다. 낙뢰는 블레이드의 파손뿐만 아니라 제어기기, 전기계통 그리고 통신선 등의 고장을 초래한다.⁵⁾ 최근 풍력발전기의 용량이 커지면서 타워의 높이 또한 커지고 있어 낙뢰에 의한 사고율이 줄어들지 않고 있는 실정이다.

그 외에도 기계의 결함과 혹한 등이 블레이드의 고장이나 손상의 원인이 되고 있으며, 원인이 밝혀지지 않은 사고가 전체 블레이드 사고의 45%를 차지하고 있다. 이것은 풍력발전기들이 무인설비로 운영되어 사고발생당시 현장에 관리자가 없기 때문에 정확한 사고원인을 밝히지 못하는 경우가 많다.

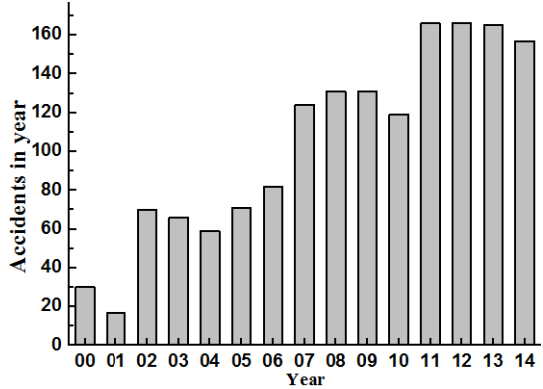


Fig. 1 Accidents in year

Table 4 Main accident category from CWIF

Accident	Number	Frequency (%)
Blade failure	273	19
Structural failure	142	10
Fire	132	9
Fatal accidents	86	6
Human injury & health	177	12
Ice throw	26	2
Transport	137	9
Environmental damage	155	10
Other	315	22
Total	1,443	100

Table 5 Main cause of blade failure

Cause	Number	Frequency (%)
Storm & Gale	73	27
Lightening	49	18
Machinery fault	25	9
Unknown	123	45
Other	3	1
Total	273	100

Table 6 Main cause of structural failure

Cause	Number	Frequency (%)
Rotor	48	33
Tower	32	22
Machinery damage	16	11
Electric device	7	5
Other	39	27
Total	142	100

2.3.2 구조적 손상으로 인한 사고

구조적 손상은 블레이드 이외의 부분에 대한 손상으로 Table 6에 나타낸 것처럼 로터손상(33%)과 타워손상(22%)이 대부분을 차지한다. 풍력발전기의 로터에 작용하는 불균형한 반복 하중은 풍력발전기에 구조적 하중을 발생시키고 이러한 하중이 타워에 지속적으로 누적되면서 피로 파괴와 수명 단축을 일으키기 때문에 로터 및 타워 사고의 주원인이 된다. 최근에는 이러한 구조적 하중을 저감시키고 풍력발전기의 작동 수명 연장에 효과가 있는 다양한 피치제어 방법들이 연구되고 있다⁷⁾. 그밖에도 기계적인 손상(11%)과 전기장치의 손상(5%) 등 주로 풍력발전기의 기계설비에서 발생한 사고이다.

2.3.3 화재로 인한 사고

풍력발전기는 무인으로 24시간 가동되기 때문에 항상 화재의 위험에 노출되어 있다. 화재 발생 원인으로서는 너셀(nacelle)내부 기계장치의 화재, 유회환제에 의한 화재 발생 등 있지만 Table 7에 나타낸 것처럼 원인이 알려진 화재 중 낙뢰에 의한 화재 발생이 16%로 가장 많다. 기계장치에 의한 화재 발생은 과전류가 발생하거나 너셀 내부 하우징들이 스파크나 과열된 기계장치에 의해 점화되는 경우 등이다. 또한 강풍에 의해 풍력발전기가 과속되어 기계들의 과열을 유발시켜 화재가 발생한다^{7,8)}.

풍력발전기에서 발생하는 화재는 인근 소방서와 먼 거리에 위치해 있고 너셀은 지상에서 높은

Table 7 Main cause of fire

Cause	Number	Frequency (%)
Lightening	21	16
Machinery fault	4	3
Overheat	9	7
Unknown	98	74
Total	132	100

위치에 있어 초기 진압에 어려움이 있다. 또한 블레이드 및 기계장치들의 추락과 타워 붕괴 등의 2차 사고가 많이 발생하는 특징을 가지고 있다.

2.3.4 인명 및 기타 사고

인명사고는 대부분 높은 곳에 있는 너셀이나 타워에서 발전기 설치 또는 수리 중 추락해서 생긴다. Table 4에 나타낸 것처럼 사망사고는 86건, 부상사고는 177건으로 풍력발전기 전체 사고 중 인명사고는 18%로 높은 비중을 차지하고 있어 작업 중 안전대책을 강화시킬 필요가 있다.

얼음으로 인한 사고는 정지 중에 블레이드나 너셀에 생긴 얼음이 블레이드가 회전하면서 얼음 파편들이 날아가서 도로나 차량 그리고 민가에 떨어져서 발생하는 사고로 26건(2%)이 있다.

이송 중 발생한 사고는 선박에서 발생되기도 하지만 대부분 도로에서 발생하고 있으며 137건으로 전체 풍력발전기 사고 중 9%로 높은 사고빈도수를 나타낸다. 주로 운전 부주의, 결박불량이나 노면결빙에 의해 차량전복, 이송물 이탈 또는 도로 주변 시설물 파손 등의 사고로 이송물이 대부분 크고 중량물이기 때문에 사고수습에 어려움이 있다.

환경오염 사고는 대부분 너셀 내부의 회전하는 기계에 사용되는 윤활유가 누유되어 너셀 외부로 누출되어 발생하는 사고로 155건(10%)으로 비교적 높은 사고 빈도수를 나타낸다. 윤활유의 누유는 대부분 발전기 운전 중 파이프 파공이나 오일 씰링 불량으로 발생하기 때문에 너셀 내부의 조도나 온도, 윤활유 레벨 등의 내부환경을 감지할 수 있는 안전시스템을 구축할 필요가 있다.

3. 결 론

본 연구는 풍력발전기 고장 및 사고사례 중 국내자료(2001~2010년) 및 일본 NEDO자료(2004~2007년) 그리고 CWIF자료(2000~2014년)를 바탕으로 풍력발전기 사고 유형을 종류별, 원인별 그리고 연대별로 분류하여 정리한 것이다. 풍력발전기의 사고 원인은 다양하지만 낙뢰에 의해 화재발생이나 블레이드 손상, 내부기기 손상 등이 많이 발생하였다는 것을 알 수 있었다. 또한 강풍은 블레이드를 손상시키고 로터에 지속적인 진동을 발생시켜 기계장치와 타워에도 많은 손상을 주었다. 따라서 낙뢰에 대한 대책과 로터의 속도 및 진동을 컨트롤 할 수 있는 장치가 필요하며, 부주의에 인한 인명사고를 줄이기 위해서 보다 강화된 작업안전 대책이 필요하다.

풍력발전단지에서 발생하는 사고와 고장에 대해 유형과 원인을 분석한 본 자료를 활용한다면 풍력발전시설의 사고 예방에 많은 도움이 될 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 2015학년도 제주대학교 학술진흥연구비 지원사업에 의하여 연구되었음.

References

1. S. C. Kwon, Domestic Wind Turbine Generators are being operated anomalistically, The Kyunghyang Shinmun, Vol. 923, 2011. 05. 03 <<http://newsmaker.khan.co.kr/khnm.html?mode=view&code=113&artid=201104271924541&pt=nv>>.

2. I. S. Yang, S. W. Kim and N. H. Kyong, 2005, "A Classification of the Wind Turbine Accident", Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 25, No. 4, pp. 29-35.

3. E&E Solutions Inc., 2009. 06, "Analysis and Countermeasure of Faults on the Wind Turbine of NEDO", No. 9 Seminar on using Wind Power Energy, pp. 69-80.

4. "Summary of Wind Turbine Accident data to 31 December 2014", CWIF 2014 <<http://www.caithnesswindfarms.co.uk/accidents.pdf>>.

5. J. H. Han, K. N. Ko and J. C. Huh, 2015, "An Application Method and Review of Lightning Protection for Wind Turbines", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 19, No. 2, pp. 5-14.

6. D. S. Yang, K. B. Kim and K. N. Ko, 2014, "A Comparative Study on Lightning Characteristics and Lightning Damage to Wind Turbines of Jeju and Gangwon Region", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 18, No. 5, pp. 137-143.

7. G. E. Jeon, T. S. No and G. S. Kim, 2014, "Design of Individual Pitch Control and Fatigue Analysis of Wind Turbine", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 38, No. 1, pp. 1-9.

8. D. H. Kim and J. H. Lim, 2014, "A Study on the Early Fire Detection based on Environmental Characteristics inside the Nacelle of Wind Turbine Generator System", Journal of Korean Society Precision Engineering, Vol. 31, No. 9, pp. 847-854.