



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

고장사례 분석을 통한 제주
풍력발전 단지운영 개선방안

濟州大學校 産業大學院

風力工學部 風力電氣·制御시스템專攻

許 官 九

2015 年 12 月

고장사례 분석을 통한 제주 풍력발전 단지운영 개선방안

指導教授 金 鎬 民

許 官 九

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2015 年 12 月

許官九의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ ①

委 員 _____ ①

委 員 _____ ①

濟州大學校 産業大學院

2015 年 12月

Improving Plan for Managing Jeju Wind Farms through the Failure Cases Analysis

Gwan-Gu Heo

(Supervised by professor Ho Min Kim)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE

MAJOR OF WIND POWER ELECTRICITY AND CONTROL
SYSTEM ENGINEERING
FACULTY OF WIND ENERGY ENGINEERING

2015. 12.

목 차

| | |
|------------------------------------|-----|
| 그림 목차 | i |
| 표 목차 | iii |
| SUMMARY | vi |
| | |
| I. 서 론 | 1 |
| | |
| II. 풍력발전기 개요 | 3 |
| 2.1 풍력발전시스템 개요 | 3 |
| 2.2 풍력발전기 구성 및 종류 | 4 |
| | |
| III. 풍력발전 개발 현황 및 제주 풍력단지 개요 | 9 |
| 3.1 세계 풍력발전 개발 현황 | 9 |
| 3.2 국내 풍력발전 개발 현황 | 11 |
| 3.3 제주풍력발전단지 개요 | 13 |
| 3.4 풍력발전단지별 발전기 사양비교 | 14 |
| | |
| IV. 제주 풍력단지 고장사례 분석 | 15 |
| 4.1 분야별 고장빈도 분석 | 15 |
| 4.2 설비별 고장빈도 분석 | 18 |
| | |
| V. 지구별 단지운영 개선방안 및 전력손실량 해석 | 28 |
| 5.1 지구별 개선방안 | 28 |
| 5.2 지구별 전력 손실량 해석 | 35 |
| 5.3 개선방안 적용 시 지구별 기대효과 분석 | 39 |
| | |
| VI. 결론 | 42 |
| | |
| 참고문헌 | 43 |

그림 목 차

| | |
|--|----|
| 그림 1 풍력발전기 구성 및 전기에너지 발생 원리 | 3 |
| 그림 2 증속기 타입 풍력발전기 내부 구조 | 4 |
| 그림 3 (a) 기계식 풍향계 (b) 기계식 풍속계 | 5 |
| 그림 4 초음파식 풍향·풍속계 | 6 |
| 그림 5 초음파식 풍향·풍속계 측정원리 | 6 |
| 그림 6 풍력발전기 피치 시스템 | 7 |
| 그림 7 풍력발전기 요 시스템 | 7 |
| 그림 8 직접 구동 타입 풍력발전기 구조 | 8 |
| 그림 9 2004 ~ 2014년 전 세계 풍력발전 용량 | 9 |
| 그림 10 2014년 상위 10개국의 풍력발전 용량과 신규 추가용량 | 10 |
| 그림 11 2006 ~ 2014년 지역별 연간 신규설비용량 변화추이 | 10 |
| 그림 12 지역별 풍력발전 분포 | 11 |
| 그림 13 고도 80 m에서의 연평균 풍속 | 12 |
| 그림 14 제주 풍력발전단지 위치 | 13 |
| 그림 15 A 지구 분야별 고장 빈도 | 15 |
| 그림 16 B 지구 분야별 고장 빈도 | 16 |
| 그림 17 C 지구 분야별 고장 빈도 | 17 |
| 그림 18 A 지구 설비별 고장 빈도 | 18 |
| 그림 19 블레이드 계통 주요 고장 부위 | 19 |
| 그림 20 풍향추종 계통 주요 고장 부위 | 19 |
| 그림 21 기어박스 계통 주요 고장 부위 | 19 |
| 그림 22 매니폴드 커버 고정 상태 | 20 |
| 그림 23 B 지구 설비별 고장 빈도 | 22 |
| 그림 24 블레이드 계통 주요 고장 부위 | 22 |
| 그림 25 슬립링 계통 주요 고장 부위 | 22 |
| 그림 26 풍향추종 계통 주요 고장 부위 | 23 |
| 그림 27 C 지구 설비별 고장 빈도 | 24 |
| 그림 28 발전기 계통 주요 고장 부위 | 24 |
| 그림 29 블레이드 계통 주요 고장 부위 | 25 |
| 그림 30 변압기 계통 주요 고장 부위 | 25 |
| 그림 31 (a) A 지구, (b) B 지구, (c) C 지구 변압기 실 | 26 |
| 그림 32 어큐물레이터 질소 충전 방법 개선 | 28 |

| | |
|---|----|
| 그림 33 (a) 초음파 타입 풍향·풍속계, (b) 측정원리 | 29 |
| 그림 34 (a) A 지구 매니폴드 커버, (b) B, C 지구 매니폴드 커버 | 30 |
| 그림 35 주 변압기 실 강판 추가설치 | 33 |

표 목 차

| | |
|-------------------------------------|----|
| 표 1 국내풍력설비 누적용량 및 연도별 신규 추가용량 | 11 |
| 표 2 지역별 풍력발전 이용률 | 12 |
| 표 3 지구별 풍력발전기 사양 | 14 |
| 표 4 A지구 장기간 정지 고장사례 | 15 |
| 표 5 B지구 장기간 정지 고장사례 | 16 |
| 표 6 C지구 장기간 정지 고장사례 | 17 |
| 표 7 지구별 변압기 사양 | 26 |
| 표 8 2014년 지구별 날시 현황 | 26 |
| 표 9 지구별 블레이드 매니폴드 재질 비교 | 30 |
| 표 10 A지구 다빈도 고장 주요 예비품 | 31 |
| 표 11 B지구 다빈도 고장 주요 예비품 | 32 |
| 표 12 C지구 다빈도 고장 주요 예비품 | 34 |
| 표 13 A지구 연도별 전력손실량 | 35 |
| 표 14 A지구 설비별 전력손실량 | 36 |
| 표 15 B지구 연도별 전력손실량 | 37 |
| 표 16 B지구 설비별 전력손실량 | 37 |
| 표 17 C지구 연도별 전력손실량 | 38 |
| 표 18 C지구 설비별 전력손실량 | 38 |
| 표 19 A지구 개선 방안 적용 후 이용률 변화 | 39 |
| 표 20 B지구 개선 방안 적용 후 이용률 변화 | 40 |
| 표 21 C지구 개선 방안 적용 후 이용률 변화 | 40 |
| 표 22 지구별 개선방안 적용 시 추가 판매금액 | 41 |

SUMMERY

In this thesis, failures of three wind farms in Jeju island were analyzed by general classification related to mechanical issue, electrical issue, and control issue. Therefore, the improvement strategies of wind turbine operation were presented. These improvements were conducted by analyzing the failure from significant contributor of blade, generator, wind direction tracking system , and etc.

The failure analysis data were divided into different operation area and periods - A area (from 2004 to 2014), B area (from 2010 to 2014) and C area (from 2011 to 2014). Technically, all cases of failure were conceptually classified according to all failures in maintenance list and business report of wind farm of Jeju island. However, the failure in cases of either automatic stop after restarting or minor reset were excluded in this analysis.

As a result of failure analysis in each operation area, frequent failure field and facility express different patterns. Generally, in case of A operation area, the frequent of mechanical issue is higher than electrical and control field. In contrast, in cases of B and C area, it shows the opposite pattern compared to A area. Moreover, as a result of failure cases analysis of facility, blade system failures frequency appears relatively higher than other facilities in all area (A, B and C).

Through the failure cases analysis, the improvement plans of wind power operation involve in spare part preparation, constructed monitoring system and the necessity regular maintenance in all wind farms commonly. Improved manifold material, changes of wind direction and gauge type , improvement of nitrogen filling method for accumulator, main transformer room restructuring, exhaustive management oversight in design and construction were obtained in each wind farm area. In cases of spare part preparations, among the most frequent facilities system, items with high frequency of failure was efficiently

set in priority because it is impossible to prepare all required maintenance spares practically.

Based on the improvement plan of wind power operation through failure cases analysis of wind farm, the annual-average capacity factor of wind generator and entire wind farm were respectively used to evaluate values of economic feasibility. Moreover, the power generation amount for calculating the amount of electricity sold was referred to SCADA database. It is confirmed that capacity factor improvement of 2.23%, 2.12%, and 2.53% for A, B, and C area, respectively, can be reached by applying improvement plan. We also investigated sales amounts of generated power, it was determined that the net profit could be obtained further as 1,702, 2,190, and 954 (one million won) for A, B, and C area, respectively.

I. 서 론

최근 세계적인 에너지 위기와 환경오염 문제의 대두에 따라 탄소가스배출 의무 감축량 시대로 접어들면서 전 세계적으로 신재생 에너지에 대한 관심과 투자가 증가하고 있다. 또한 2011년 일본 동북부 지방의 대형 쓰나미에 의한 원자력발전소 사고사례는 일반 국민들로 하여금 원자력발전에 대한 공포심을 갖게 하였으며 이는 지속적으로 제기 되어왔던 지구 온난화 문제와 더불어 신재생에너지에 대한 관심을 더욱 높이고 있다. 이러한 신재생 에너지원 중 풍력발전은 태양광발전과 더불어 전 세계적으로 가장 활발히 연구가 진행되고 있으며 상당한 기술적인 진전과 함께 이미 상용화를 이루었다 [1]. 특히 제주도의 경우는 2030년까지 신재생 에너지로 100% 대체하여 탄소 없는 섬 구축을 목표로 하고 있으며 그에 따라 약 10조원을 투자하여 2 GW의 해상풍력을 구축하기 위한 정책을 추진 중이기도 하다 [2].

그러나 풍력발전기술은 독일, 덴마크, 미국 등 주로 일부의 선진국에 의해 주도되어지고 있어 국내 풍력발전단지 대부분이 풍력 기자재를 수입하여 설치 운영 중에 있다. 따라서 국내풍력발전단지 대부분은 건설 후에도 풍력발전기 유지보수를 고가의 비용을 지불하고 제작사에 위탁하고 있는 실정이다. 이에 국내의 주요 기업들도 풍력발전에 많은 관심과 투자를 하고 풍력 기자재에 대하여 국산화를 진행하고 있지만 타워나 블레이드 외에 주요 기자재들은 대부분 수입하여 조립하는 수준에 그치고 있다.

이러한 문제점은 곧 풍력발전운영에도 큰 영향을 끼친다. 수입 기자재 사용과 기술 유출을 꺼려하는 제작사의 정책으로 고가의 비용을 지불하고 유지보수를 위탁하고 있음에도 불구하고 풍력 발전 운영사들에 정비기술이 전수되지 않고 있다. 또한, 위탁정비계약이 종료되어 풍력발전기를 직접 정비하려는 풍력 발전 운영사들은 고가의 비용을 지불하고도 정비기술이 전혀 이수되지 않아 풍력 발전기 고장 시 많은 시간 및 비용이 소요되고 있으며 이는 기술자립도 측면 뿐만 아니라 경제적인 측면에서도 악영향을 끼쳐 국내 풍력발전산업의 성장을 저해하는 요인으로 떠오르고 있다. 이에 국내 일부의 풍력 발전 운영사들은 정비사례와

노하우들을 서로 공유하며 정비 기술 능력을 강화하는데 역량을 다하고 있다. 따라서 본 논문에서는 제주풍력발전단지의 고장 사례 비교 분석을 통해 풍력발전 단지 운영개선방안에 대하여 논하여 보고자한다.

II. 풍력발전기 개요

2.1 풍력발전시스템 개요

풍력발전이란 자연의 바람으로 풍차를 돌리고 이것을 증속기 등을 이용하여 회전수를 증가시켜 발전기를 돌리는 발전 방식을 말한다. 인류는 예전부터 여러 가지 형태로 바람에너지를 이용해 왔는데 바람에너지를 전기에너지로 변환하는 풍력발전은 1980년대 이후 오일과동 및 환경 문제 등의 대두로 본격적으로 개발되기 시작했다.

풍력발전의 기본적인 원리는 그림 1과 같이 자연의 바람에 의해 날개를 회전시키고 증속기(Gearbox)로 증가시킨 회전동력을 발전기로 전달하여 전기를 생산한 후 수용가로 보내는 형태이다. 위와 같은 원리에 의하여 동작하는 풍력발전기의 출력은 이론적으로 식(1)과 같다 [3].

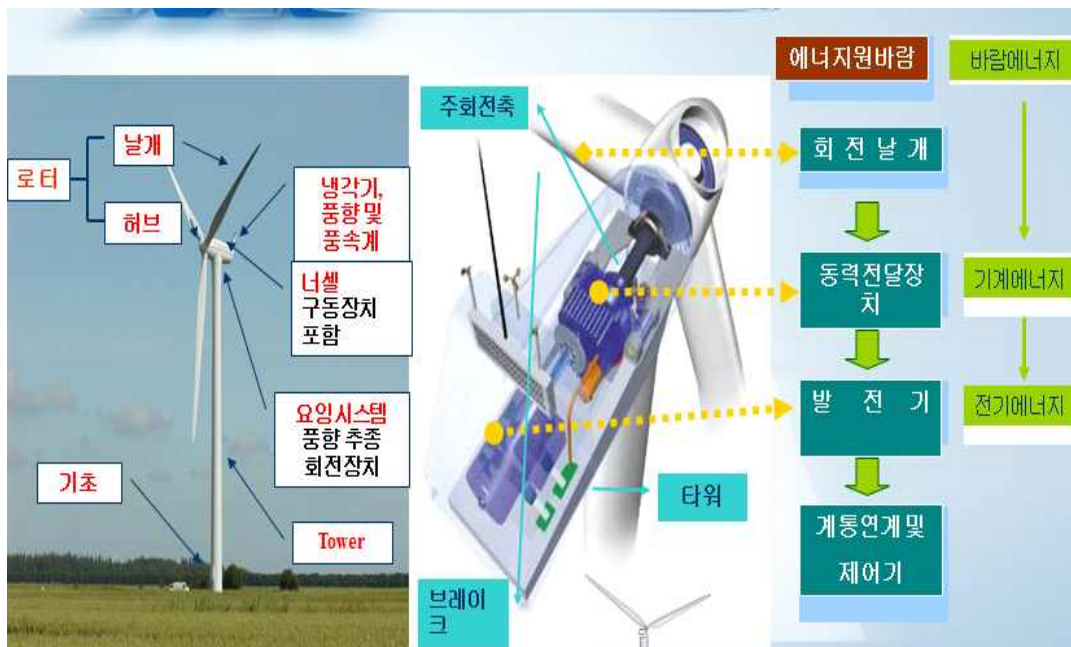


그림 1. 풍력발전기 구성 및 전기에너지 발생 원리

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 [W/m^2] \quad (1)$$

여기서 ρ 는 공기밀도, V 는 풍속, A 는 날개의 회전 면적으로 풍력발전기의 발전량은 풍속의 세제곱에 비례함을 알 수 있는데 이는 풍력발전에서 풍속이 상당히 중요한 요소임을 알 수 있다.

2.2 풍력발전기 구성 및 종류

풍력발전기 구조에 대해 살펴보면 크게 증속기 타입과 직접 구동 타입으로 구분할 수 있다. 두 타입을 구분하는 가장 큰 요인은 증속기(기어박스) 존재의 유무이다. 그림 2와 그림 8을 통하여 두 타입의 풍력발전기 내부 구조를 좀 더 자세히 비교할 수 있다.

제작사에 따라 내부 구조의 모습은 달라질 수 있으나 일반적으로 증속기가 있는 타입은 그림 2와 유사하다 [3]. 증속기 타입의 경우 기어박스라는 동력전달장치가 있으며 이것은 발전기 전단에 위치하여 바람의 힘에 의해 회전하는 축의 회전 속도를 증가시켜 발전기로 전달하여 원하는 RPM이 나오도록 하는 장치이다. 변압기의 경우 풍력발전기 특성상 접근이 어려워 반영구적인 몰드형 변압기를 주로 쓰며, 발전기 종류에 따라 풍력발전기 상부에 위치하거나 타워 하부에 위치한다. 간혹 풍력 발전기 외부에 변압기가 위치한 종류도 있는데 그러한 경우 유입 변압기를 쓰기도 한다.



그림 2. 증속기 타입 풍력발전기 내부 구조

풍향·풍속계는 풍력발전기 너셀 외부 후면에 위치하여 풍향과 풍속을 측정하여 주 제어기로 보내어 준다. 풍향과 풍속값을 주 제어기에서 너셀을 회전시키는 요 시스템과 피치 시스템으로 각각 보내주어 풍력발전기 방향과 블레이드 회전 속도를 적절하게 유지할 수 있게 한다. 초기에는 그림 3의 풍향계와 같은 기계식 타입을 너셀 외부 후면에 설치하여 비교하는 방식으로 풍향을 측정하였다. 기계식 풍속계의 경우 다음의 식(2)를 이용하여 풍속을 계산한다.

$$W = 0.09008 \times f + 0.5232 \quad (2)$$

여기서, 주파수 f 는 풍속계가 1초당 1회전 시 10 Hz로 본다. 이러한 방식의 풍향·풍속계는 염분이나 습분 등에 의한 기계적인 고착이 발생하는 문제점이 있다. 따라서 최근에는 초음파 방식의 풍향·풍속계를 이용하는데 제작사 마다 명칭은 조금씩 다르지만 보통 Ultra Sonic Sensor로 불리우며 이것은 하나의 센서로 풍향과 풍속을 동시에 측정한다. 측정원리는 그림 5와 같이 두 개의 반사판(Reflector)사이의 공기 흐름이 있으면 초음파가 발생하고 그것을 진동격막(Vibrating Diaphragms)에 의해 전기적인 신호를 발생하여 주 제어기로 보내어진다.

피치 시스템은 풍력 발전기의 가장 중요한 부분 중 하나로 블레이드 각도 제어 시스템이라 할 수 있다. 풍속에 따라 블레이드의 각도를 제어하여 풍력 터빈을 보호하며 적정 출력을 낼 수 있도록 한다.



(a)



(b)

그림 3. (a) 기계식 풍향계 (b) 기계식 풍속계

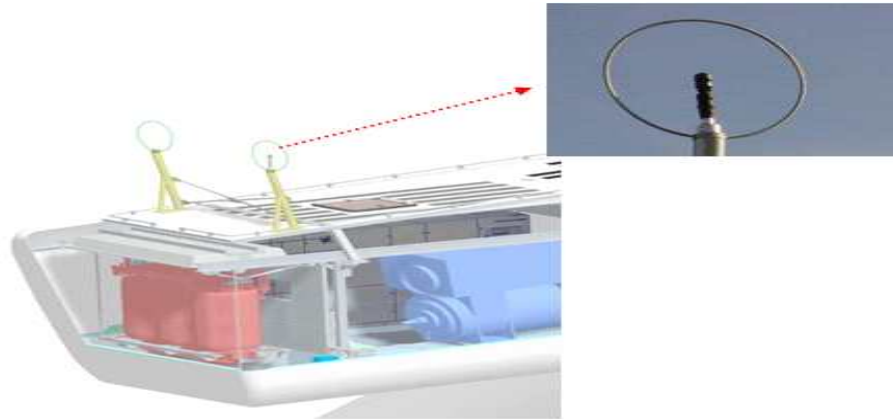


그림 4. 초음파식 풍향·풍속계

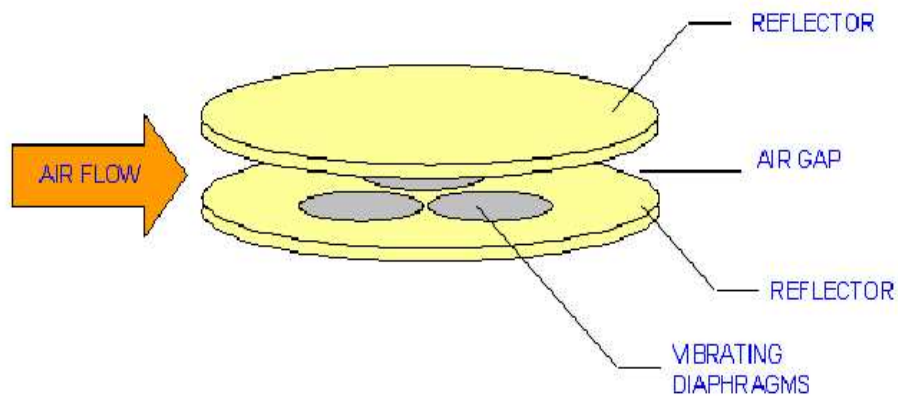


그림 5. 초음파식 풍향·풍속계 측정원리

타입에 따라 유압 또는 전기 모터에 의해 구동되어진다. 그림 6은 유압 타입 피치 시스템의 블레이드 단면을 나타낸다. 피치 시스템은 허브에 위치하며 그림 1과 그림 2를 참고하면 위치에 대한 이해가 쉬울 것이다. 유압 타입의 피치 시스템을 가진 풍력발전기에서는 그림 6과 같이 유압에 의해 액추에이터를 동작시켜 블레이드의 각도를 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 로 제어한다.

피치 시스템과 함께 풍력 발전기의 중요한 부분 중 하나가 요 시스템이라 할 수 있다. 요 시스템이란 풍향계로부터 바람의 방향을 받아 너셀을 회전시키는 역할을 한다. 바람의 방향 변화에 따라 너셀을 회전시켜주지 못하면 발전효율이 떨어짐은 물론 블레이드에 스트레스가 가중되어 기대수명 저하 및 나아가 풍력터빈의 파손으로 이어질 수 있다.

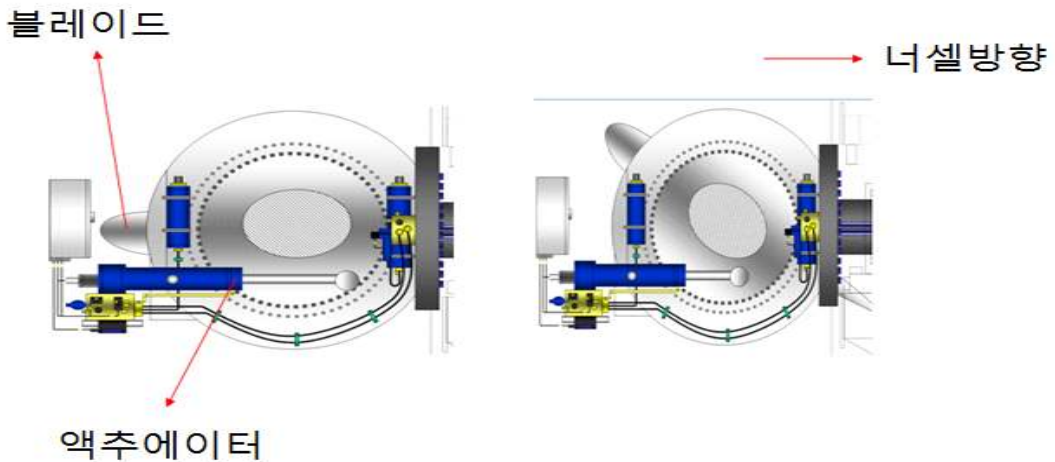


그림 6. 풍력발전기 피치 시스템

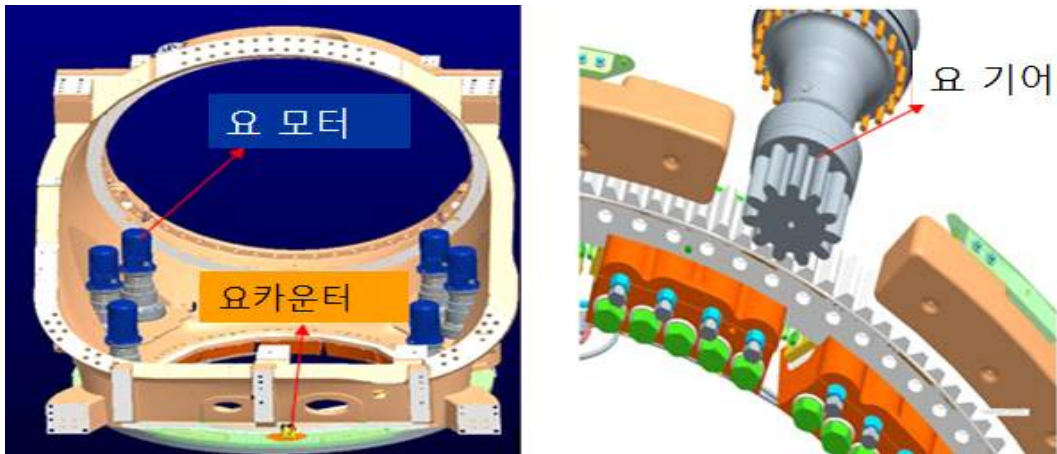


그림 7. 풍력발전기 요 시스템

그림 7과 같이 요 시스템은 보통 요 모터와 요 기어 그리고 요 카운터 부분으로 구성되어 있다. 요 모터가 동작하면 내부의 여러 감속기들을 거쳐 최종적으로 요 기어로 동력이 전달되어 너셀을 회전시켜주는 구조이다. 요 카운터는 주 제어기로부터 신호를 받아 너셀 방향과 풍향을 비교하여 너셀을 시계방향으로 회전시킬지 반시계방향으로 회전시킬지 결정하는 장치이다. 또한 너셀의 회전에 의한 풍력발전기 상부와 하부에 연결된 전력 케이블이나 통신 케이블 등의 손상을 막기 위하여 한 방향으로 1080° 이상 회전하게 되면 자동으로 반대방향으로 회전시켜 케이블의 꼬임을 풀어준다. 이러한 요 시스템은 보통 풍력발전기 1기당 4

~ 6개의 요 기어로 구성되어 있다.

직접 구동 타입 풍력발전기와 증속기 타입의 가장 큰 차이점은 증속기(기어박스) 라는 회전수를 증속하여 동력을 전달해주는 장치의 유무이다. 직접 구동 타입의 풍력발전기는 증속기가 없는 대신 발전기의 극수를 늘리는 방법을 이용한다. 따라서 직접 구동 타입의 풍력발전기는 발전기가 크며 외관상 보기에 너셀의 모양도 증속기 타입은 사각형의 평평한 모습을 갖으나 직접 구동 타입의 경우 그림 8과 같이 원형의 위아래로 길쭉한 모양을 주로 갖는다 [4].



그림 8. 직접 구동 타입 풍력발전기 구조

Ⅲ. 풍력발전 개발현황 및 제주 풍력단지 개요

3.1 세계 풍력발전 개발 현황

세계 풍력발전 시장은 덴마크, 독일 등 유럽 연합 국가 중심으로 성장을 해왔고 최근 들어서는 미국과 중국이 자국 내 풍력발전 설치용량을 대폭 증가시키며 풍력발전시장을 주도하고 있다. 그림 9의 풍력발전 용량을 살펴보면 2014년 기준 세계 풍력발전 총 누적용량이 370 GW이며 [6], 신규설치 용량은 약 51 GW로 2013년 대비 약 44%의 증가세를 보였다. 연간 풍력신규설비 용량이 50GW를 초과한 것은 2014년도가 처음으로 이는 원전 5기에 해당하는 설비 용량이다 [5].

풍력발전성장을 이끌고 있는 국가는 중국, 미국, 독일, 스페인, 인도 등 이른바 풍력발전 BIG 5로 불리는 국가들이며, 전체의 약 73%를 차지하며 상위 10개국으로 확대하면 차지하는 비중이 약 85%를 넘어선다. 또한 2014년 신규설비 용량에서는 중국이 23GW로 전 세계 전체의 거의 절반에 육박하며 독일(5.3GW), 미국(4.9GW), 브라질(2.5GW), 인도(2.3GW) 순이다 [6].

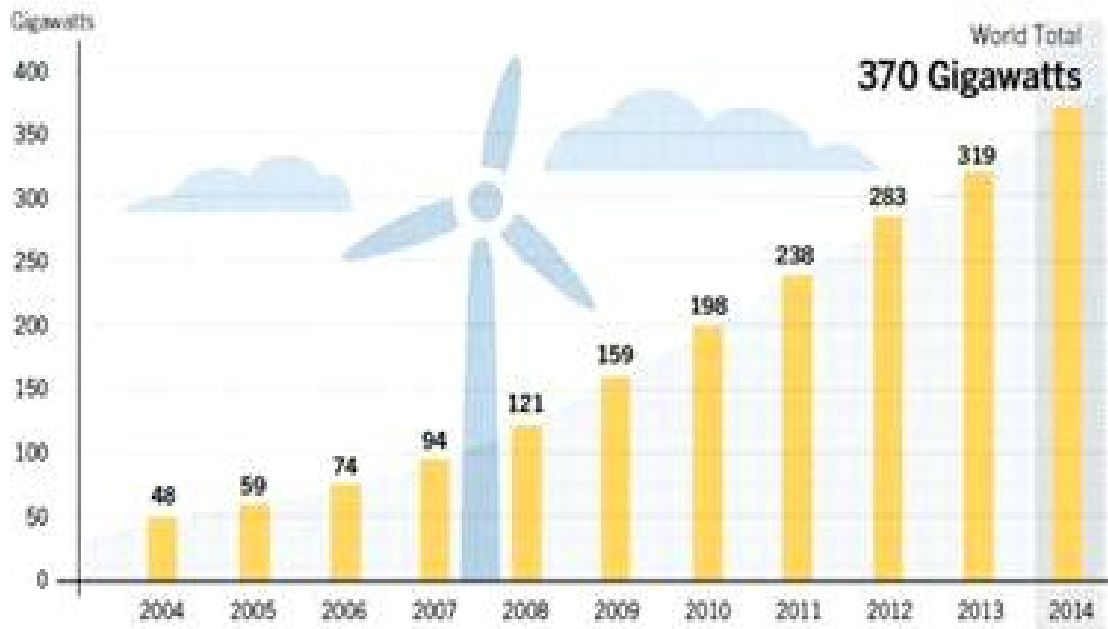


그림 9. 2004~2014년 전 세계 풍력발전 건설 용량

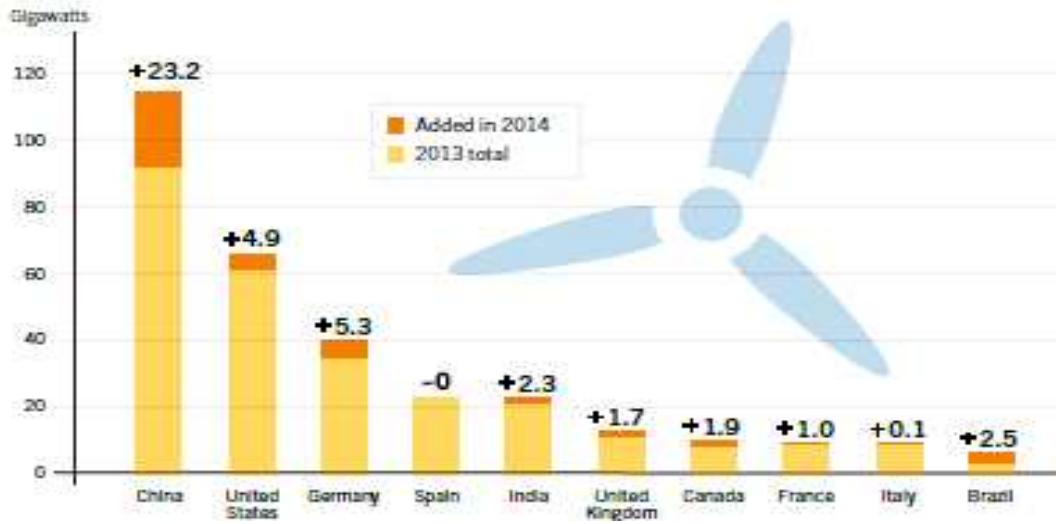


그림 10. 2014년 상위 10개국의 풍력발전 용량과 신규 추가 용량 [6]

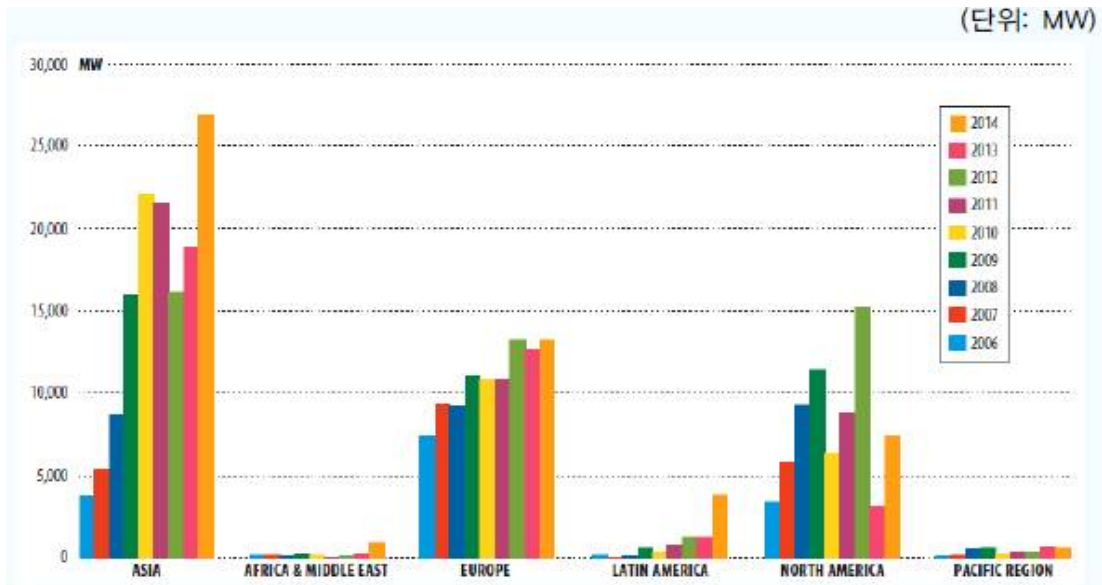


그림 11. 2006~2014년 지역별 연간 신규설비용량 변화 추이 [7]

대륙별로 보면 풍력발전 누적 용량은 유럽, 아시아, 북미 순이나 신규설치 면에서 아시아와 북미의 신규설치 용량이 지속적으로 증가하여 이른 시일 내에 누적 용량에서도 유럽을 넘어설 것으로 예상된다 [7].

3.2 국내 풍력발전 개발 현황

국내 풍력발전 산업은 아직 초기 단계로 각 지방자치단체에 의해 주도되고 있으나, 점차적으로 한전 자회사인 발전회사와 풍력발전기 제작사 등 민간업체에 의해 설치 및 운영되는 풍력발전단지가 증가하는 추세이다. 2014년 10월 기준 설치되어 운전 중인 풍력발전소는 총 340여기, 총 누적설비용량은 605 MW이다 [8].

표 1. 국내풍력설비 누적 용량 및 연도별 신규 추가 용량 (2014년 10월 기준)

| 연도 | 설비용량(kW) | |
|------|----------|---------|
| | 신규 | 누계 |
| ~99 | 3,345 | 3,345 |
| 2000 | 1,500 | 4,845 |
| 2001 | 1,980 | 6,825 |
| 2002 | 3,750 | 10,575 |
| 2003 | 3,480 | 14,055 |
| 2004 | 23,390 | 37,455 |
| 2005 | 28,000 | 65,445 |
| 2006 | 109,350 | 174,795 |
| 2007 | 21,150 | 195,945 |
| 2008 | 105,250 | 301,195 |
| 2009 | 50,900 | 352,095 |
| 2010 | 21,250 | 373,345 |
| 2011 | 33,000 | 406,345 |
| 2012 | 76,300 | 482,645 |
| 2013 | 78,650 | 561,295 |
| 2014 | 43,900 | 605,200 |

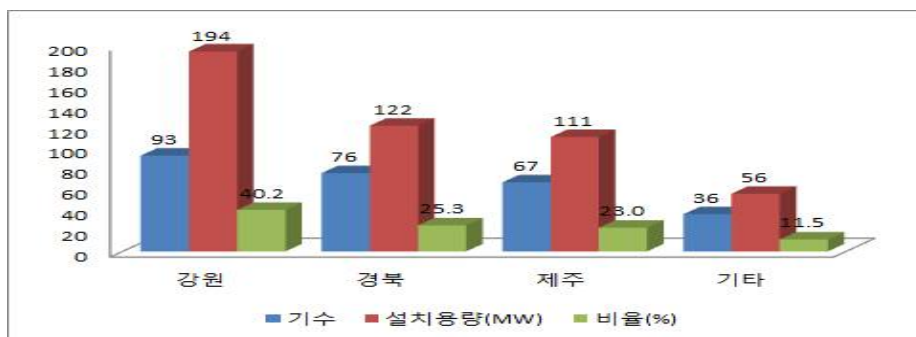


그림 12. 지역별 풍력발전 분포

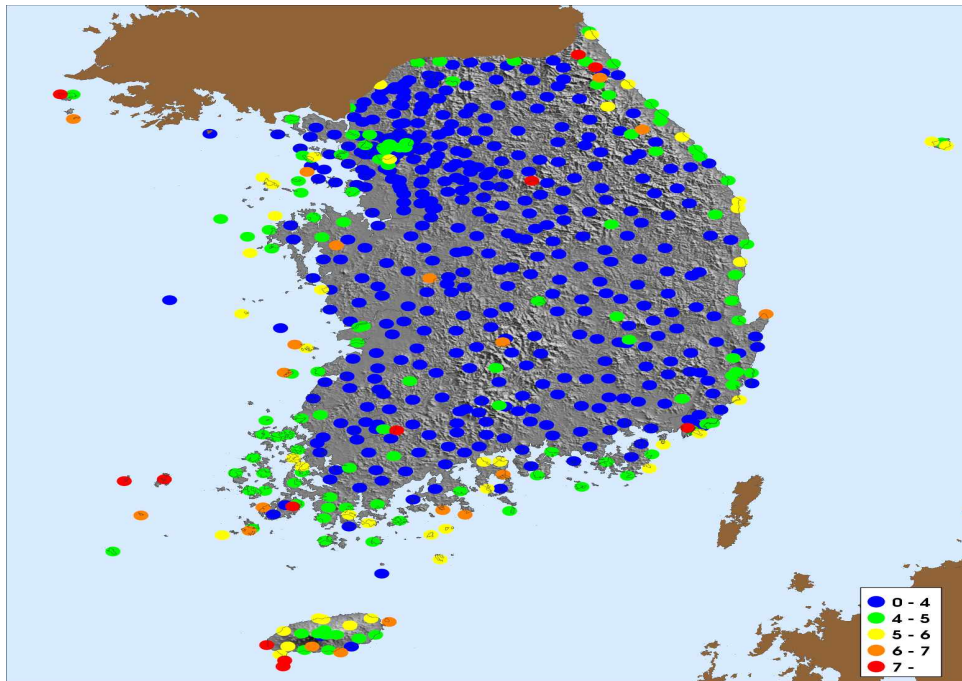


그림 13. 고도 80m 에서의 연평균 풍속

표 2. 지역별 풍력발전 이용률(단위 : %)

| 구분 | 인천 | 경기 | 강원 | 전북 | 전남 | 경북 | 제주 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2011 | 11.17 | 12.24 | 23.59 | 13.98 | 26.34 | 31.66 | 24.23 |
| 2012 | 14.43 | 14.23 | 21.12 | 13.60 | 21.71 | 29.55 | 22.13 |
| 2013 | 12.65 | 12.13 | 26.89 | 15.54 | 11.79 | 30.49 | 25.84 |
| 평균 | 12.76 | 12.68 | 23.87 | 14.97 | 19.96 | 30.67 | 24.07 |

그림 12에서 보는 것과 같이 국내 풍력설비 대부분이 강원도, 경상북도의 백두대간 줄기와 제주도 세 지역에 90% 가까이 편중되어 있다.

이처럼 편중되어 있는 이유는 그림 13에서 보는 바와 같이 풍력발전 경제성이 있는 풍속을 갖는 지역이 우리나라의 동해안 지역과 제주, 서해안 일부지역 밖에 없기 때문이다 [9].

표 2의 현재 운영 중인 풍력발전단지의 이용률을 살펴보다라도 경북, 제주, 강원 지역의 이용률이 타 지역보다 높다. 이는 지역별 풍력발전 편중의 직접적인 이유가 될 것이다.

3.3 제주 풍력발전단지 개요



그림 14. 제주 풍력발전단지 위치

본 논문의 A, B, C 풍력단지는 제주도 동·서부에 위치한 풍력발전단지이다. A, B 풍력발전단지는 제주도 서부지역인 한경면 신창리와 용수리 해안에 위치하여 각 2004년, 2008년부터 상업운전을 하고 있으며, C 풍력발전단지는 제주도 동부 중산간 지대에 위치하여 2009년부터 운영 중에 있다.

A 풍력단지의 경우 사업기간이 '03.06 ~ '04.03이며, NEG-Micon社의 NM-72C 기종을 사용하였다. 발전기 용량은 1.5 MW이며 4기 운영 중으로 총 설비 용량은 6 MW이다. B 풍력발전단지는 사업기간이 '07.04 ~ '08.02이며 Vestas社의 V-90 기종을 사용하였다. V-90기종은 설비용량이 3 MW로 5기 운영하여 총 설비용량은 15 MW이다. C 풍력발전단지는 건설시점에 따라 1단계 6대, 2단계 4대로 나누어지기는 하지만 동일 기종인 Vestas社의 V-80 풍력발전기를 사용하였으므로 본 논문에서는 하나의 풍력발전단지로 보도록 하겠다. V-80의 설비용량은 2 MW로 10기 운영하여 총 설비용량 20 MW이다.

3.4 풍력발전단지별 발전기 사양 비교

A지구는 제작사가 NEG-Micon社이며 B와 C 지구는 Vestas社이다. 각 지구 발전기의 외관 사양은 유사하나 A지구의 발전기 타입은 농형유도발전기, B와 C 지구는 DFIG 타입을 적용하였다.

표 3. 지구별 풍력발전기 사양 [11],[13].

| Data | | A Wind Park | B Wind Park | C Wind Park |
|--------------------------------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Items | | | | |
| Manufacturer | | NEG-Micon | Vestas | Vestas |
| Model | | NM72C | V90 | V80 |
| Nominal Rating (kW) | | 1,500 | 3,000 | 2,000 |
| The number of blade / Wind Direction | | 3/Upwind | 3/Upwind | 3/Upwind |
| Generator | Type | 농형유도발전기 | DFIG | DFIG |
| | Speed (RPM) | 1,214 | 1,758 | 2,016 |
| Rated Frequency | Voltage / | 600/60 | 1000/60 | 690/60 |
| Wind Condition (m/sec) | Cut-in | 4m/s | 4m/s | 4m/s |
| | Rated | 15m/s | 15m/s | 15m/s |
| | Cut-out | 25m/s | 25m/s | 25m/s |
| | Maximum wind speed in design | 59.5m/s (3 second average) | 70m/s (3 second average) | 70m/s (3 second average) |
| Blade | Blade Dia. (m) | 72 | 90 | 80 |
| | Swept Area (m ²) | 4,072 | 6,362 | 5,027 |
| Hub Height (m) | | 62 | 80 | 78 |
| Tower | Type | Tubular Tower | Tubular Tower | Tubular Tower |
| | Material | SM490A | S355 J2G31/NL | S355 J2G31/NL |
| Type of Brake System | | Aerodynamic and mechanical brake | Aerodynamic and mechanical brake | Aerodynamic and mechanical brake |
| Weight (ton) | 철탑 (tower) | 69.4 | 155 | 152.5 |
| | 낫셀 (nacelle) | 43.0 | 68.0 | 67.5 |
| | 로터 (rotor) | 23.1 | 39.8 | 37.2 |

IV. 제주 풍력단지 고장사례 분석

4.1 분야별 고장빈도 분석

A 지구의 고장빈도를 살펴보면 기계분야의 고장이 전기, 제어 분야와 비교하여 많음을 알 수 있다. 이것은 A 지구의 경우 stall 제어방식 적용으로 극한 상황 시 진동 및 소음 발생가능성이 크며 타 지구에 비해 장기간 운전으로 기계장치 피로 누적에 의한 것으로 분석되어진다[10]. 또한 A 지구는 농형유도발전기 타입으로 DFIG 타입의 B 지구, C 지구와 비교하여 전기설비 및 제어장치가 비교적 단순하다.

표 4. A지구 장기간 정지 고장사례

| 호기 | 분야 | 고장사례 | 정지일수 |
|-----|----|-----------------------|------|
| 1호기 | 기계 | 기어박스 교체 | 99일 |
| 2호기 | 기계 | 블레이드 베어링 실링 | 114일 |
| | 기계 | 메인 베어링 교체 | 105일 |
| 3호기 | 전기 | 발전기 교체 | 82일 |
| 4호기 | 기계 | 블레이드 유압 메인펌프 및 커플링 교체 | 64일 |

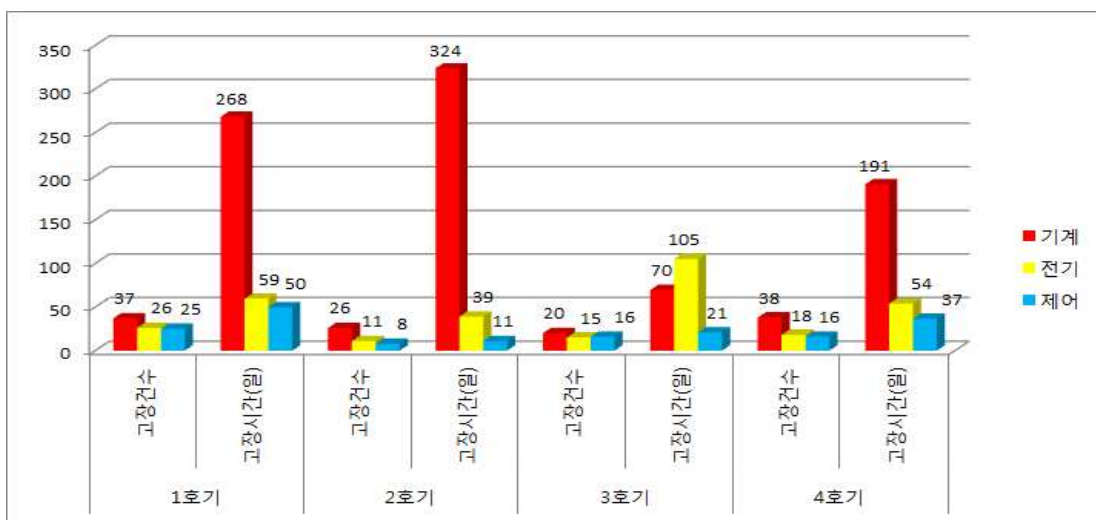


그림 15. A지구 분야별 고장 빈도

B 지구의 고장 빈도를 살펴보면 전체적으로 A 지구 보다 전기, 제어설비의 고장 빈도가 많음을 알 수 있다. B 지구의 경우 DFIG 타입 적용하였는데, DFIG 타입의 경우 전력 컨버터로 여자권선의 전압, 주파수를 제어하여 가변속 운전이 가능하지만 시스템이 복잡해지는 단점이 있다[10]. 그러한 점 때문에 기계장치의 고장정지 빈도보다 전기, 제어 장치의 고장 빈도가 높은 것으로 분석된다.

1호기의 경우 시공하자에 의한 타워 기초 보강공사로 기계분야 고장 정지가 많았으며 그 시간을 제외할 경우 기계분야 고장정지 시간이 대폭 줄어들음을 알 수 있다. 5호기 경우에는 돌풍에 의한 요 기어 파손으로 자재수급 및 교체에 소요시간이 길어 기계분야의 고장빈도는 적으나 고장정지 시간이 긴 것으로 분석되었다.

표 5. B 지구 장기간 정지 고장사례

| 호기 | 분야 | 고장사례 | 정지일수 |
|-----|----|-----------------|------|
| 1호기 | 기계 | 타워 기초 구조물 보강공사 | 255일 |
| 2호기 | 제어 | PLC 소프트웨어 업그레이드 | 68일 |
| | 기계 | 블레이드 크랙 | 32일 |
| 3호기 | 제어 | 허브/너셀 간 통신계통 | 58일 |
| 4호기 | 전기 | 발전기 리드선 및 슬립링 | 35일 |
| 5호기 | 기계 | 요기어 교체 | 69일 |
| | 전기 | 발전기 리드선 및 슬립링 | 38일 |

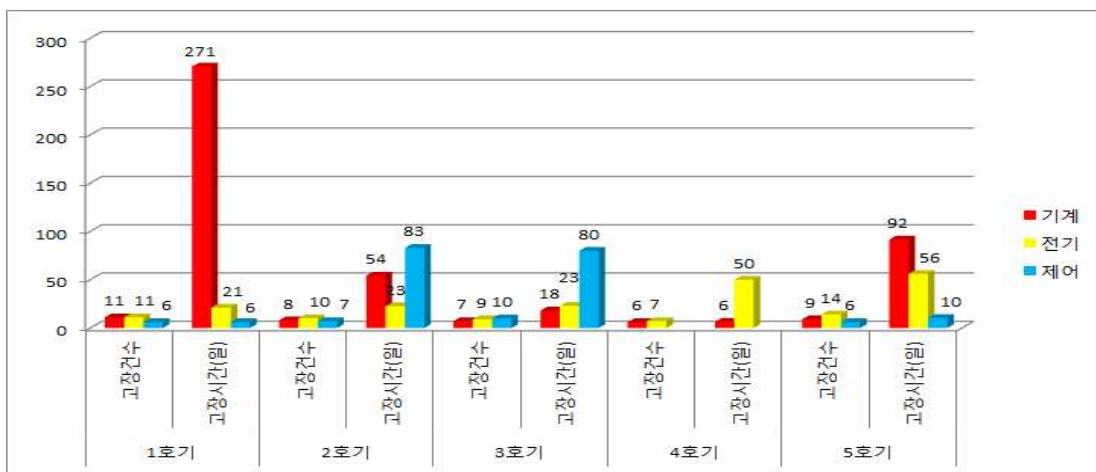


그림 16. B지구 분야별 고장 빈도

C 지구 분야별 고장을 살펴보면 전기 분야의 고장이 기계나 제어분야보다 많이 발생하였음을 알 수 있으며, 주로 발전기 리드와이어와 주변압기의 고장 빈도가 높은 것으로 분석되었다. 그러나 5호기는 B 지구의 1호기와 마찬가지로 시공 하자에 의한 타워 진동 현상이 발생하여 타워 기초 보강공사에 의해 장기간 정지하는 사례가 발생 하였다.

표 6. C 지구 장기간 정지 고장사례

| 호기 | 분야 | 고장사례 | 정지일수 |
|-----|----|--------------|------|
| 2호기 | 전기 | 발전기 리드와이어 교체 | 32일 |
| 5호기 | 기계 | 타워기초구조물 보강공사 | 180일 |
| 6호기 | 전기 | 주변압기 점검 및 교체 | 15일 |

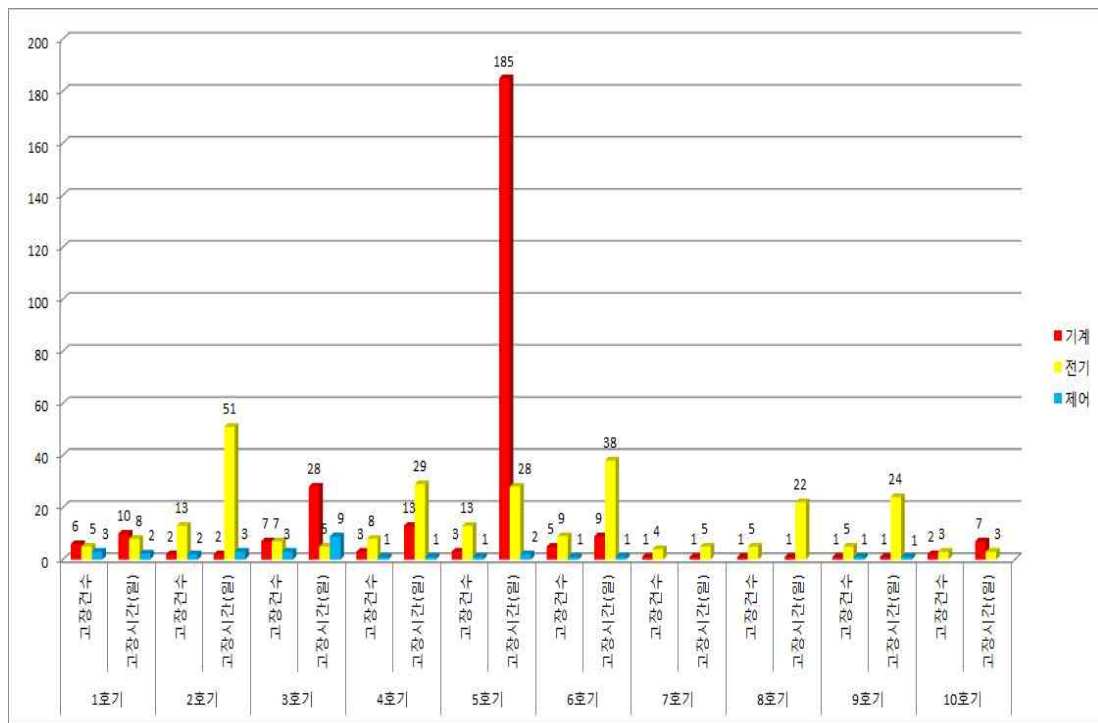


그림 17. C 지구 분야별 고장 빈도

4.2 설비별 고장 빈도 분석

1) A 지구 설비별 고장 빈도 분석

A 지구의 고장 빈도를 설비별로 분석해 보면 블레이드 계통, 풍향추종계통, 기어박스 계통에서 고장이 많은 것으로 분석되었다.

설비별 고장 빈도 상위 세 계통, 블레이드 계통, 풍향추종계통, 기어박스 계통을 좀 더 구체적으로 살펴보았다. 그림 19는 블레이드 계통의 주요 고장 부위이다. 블레이드 유압 매니폴드에서의 고장 발생이 가장 많았고 유압오일, 펌프, 어큐뮬레이터, 유압호스 등에서 고장이 주로 발생한 것으로 분석되었다.

풍향추종계통의 주요 고장 부위는 그림 20과 같다. 요 브레이크 캘리퍼에서 고장 발생이 가장 많았고, 매니폴드, 풍향·풍속계 등에서 주로 발생하였다.

기어박스 계통의 주요 고장 부위는 그림 21과 같다. 기어오일과 모터, 펌프 등의 고장 발생이 많았으며 기어박스 내부 헬리컬 기어문제로 인한 기어박스 교체는 분석 및 자재 수급, 교체 작업 등의 시간이 오래 걸려 발생건수는 1회이나 장기간 정지한 것으로 분석되었다.

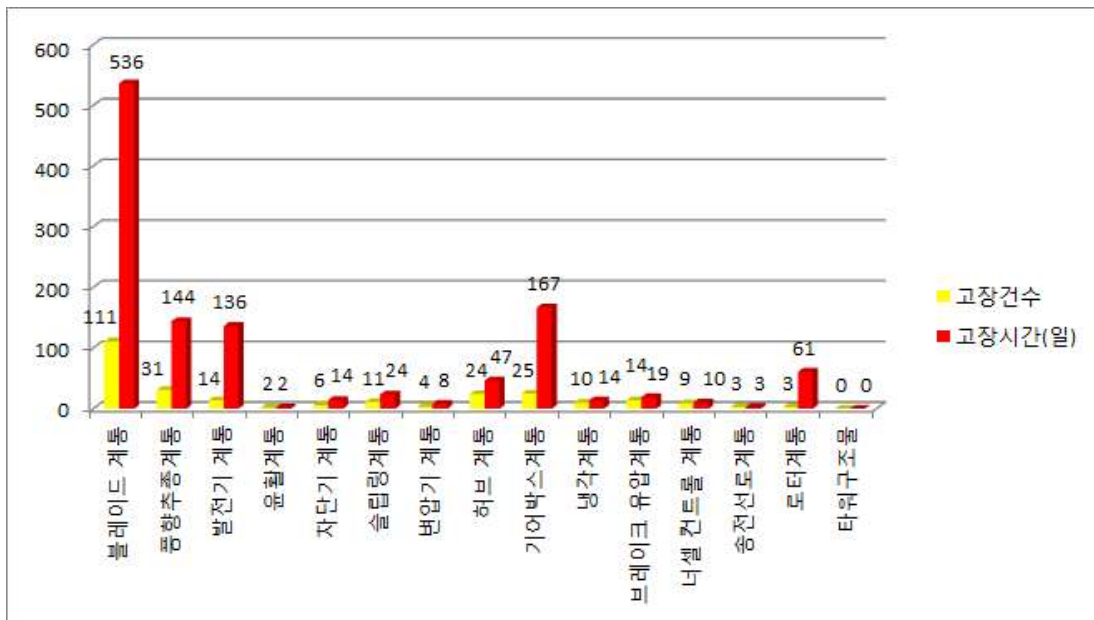


그림 18. A 지구 설비별 고장 빈도

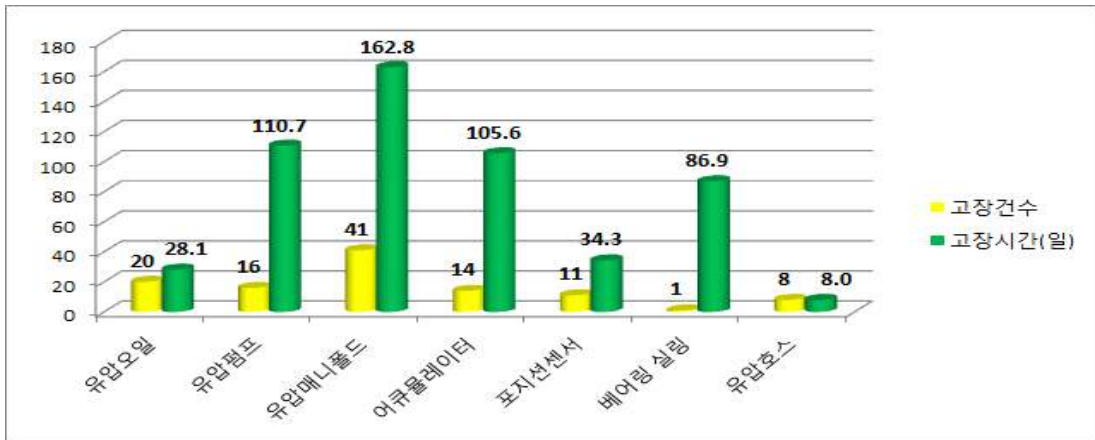


그림 19. 블레이드 계통 주요 고장 부위

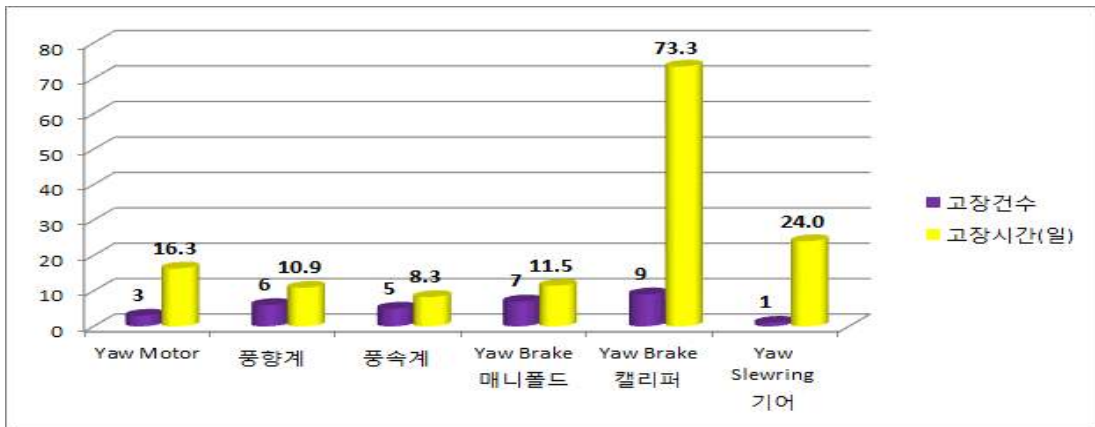


그림 20. 풍향추종계통 주요 고장 부위

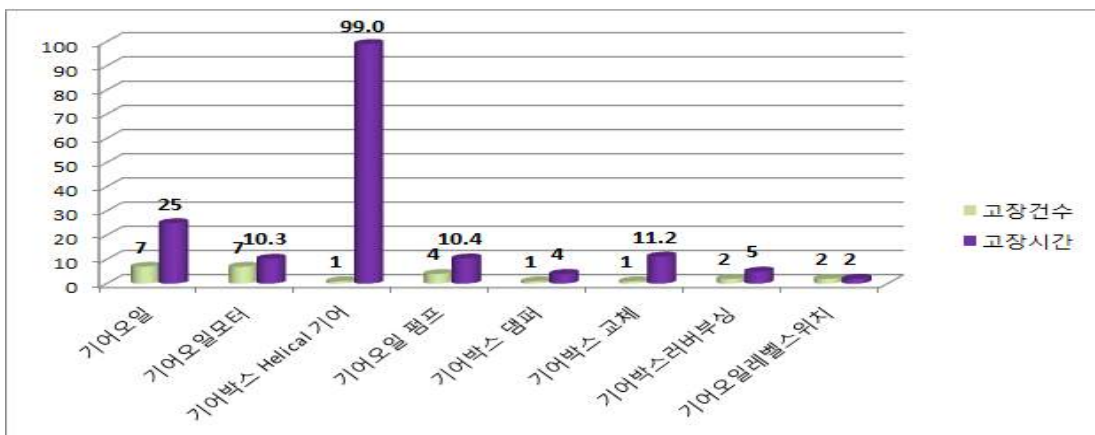


그림 21. 기어박스계통 주요 고장 부위

2) A 지구 주요 고장 원인 분석

(1) 블레이드 매니폴드 커버 구조



그림 22. 매니폴드 커버 고정상태

블레이드 계통의 유압 매니폴드 고장을 분석해 보면 매니폴드 커버 이탈이 2차사고로 이어져 풍력발전기 고장정지가 발생한 것으로 분석되었다.

매니폴드는 타워상부 회전체인 허브에 위치하여 있으며 매니폴드 커버는 매니폴드의 전송기나 각종 센서 등을 보호하기 위하여 설치되어 있다. 그러나 커버가 고정 볼트 1개에 의하여 고정되어 있어 회전에 의한 원심력이나 내부 진동 등으로 커버가 열리거나 고정 볼트가 파손 되는 경우가 발생하였고 그에 따른 2차 사고로 이어진 것으로 분석되었다.

(2) 블레이드 매니폴드 재질 강도

블레이드 매니폴드 균열에 의한 고장 분석을 위하여 A 지구와 B, C 지구 매니폴드 재질을 비교하여 보았다. A 지구는 AL7075 재질로서 인장강도가 276 Mpa, 항복강도가 145 Mpa이며, B, C 지구는 SS400 재질로서 인장강도 400 Mpa, 항복강도 245 Mpa이다. 실제 A 지구는 매니폴드 균열에 의한 고장정지가 다수 발생하였으나 B, C 지구는 매니폴드 균열에 의한 고장 정지가 없어 A 지구 매니

폴드 균열에 의한 고장 정지는 재질의 강도가 낮아 발생한 것으로 분석되었다.

(3) 블레이드 어큐물레이터 질소압 저하

블레이드 어큐물레이터는 블레이드 각도 유지를 위한 적정 압력 유지 및 유압 오일 충·방전 시 완충역할을 한다. 그러나 지속적인 피치 변화 및 유압 오일 충·방전으로 피로 누적에 의한 어큐물레이터 내부 블레더에 핀홀이 생기거나 접속 부에서 내부 질소가 미세하게 리크 되는 현상이 발생하여 고장 정지가 되는 것으로 분석되었다.

(4) 풍향·풍속계 베어링 고착

A 지구 풍향·풍속계는 기계식으로 외부환경의 영향에 의하여 베어링 고착에 의한 고장 정지가 많이 발생하였다. 특히 A 지구의 경우 해안가에 위치하여 있어 염분에 의한 고착이 많은 것으로 분석되었다.

3) B 지구 설비별 고장 빈도 분석

B 지구의 고장 빈도를 설비별로 분석하여 보면 A 지구와 마찬가지로 블레이드 계통에서 가장 많이 발생하였으며, 슬립링 계통, 풍향추종계통이 다음으로 많은 고장이 발생 하였다.

설비별 고장 빈도 상위 세 계통, 블레이드 계통, 슬립링 계통, 풍향추종계통을 좀 더 구체적으로 살펴보았다. 그림 24는 블레이드 계통의 주요 고장 부위이다. A 지구와는 다르게 매니폴드보다는 블레이드 포지션 센서에서의 고장 발생이 가장 많았고 유압밸브, 어큐물레이터, 유압펌프 등에서 고장이 주로 발생하였다.

슬립링계통의 주요 고장 부위는 그림 25와 같다. 슬립링에서 고장 발생이 가장 많았고, 브러쉬, 흡입팬 등에서 주로 발생하였다.

풍향추종계통의 주요 고장 부위는 그림 26과 같다. 요 모터, 요 기어 등에서 고장 발생이 많았으며, A 지구와는 다르게 풍향·풍속계 고장은 1회 밖에 없었다.

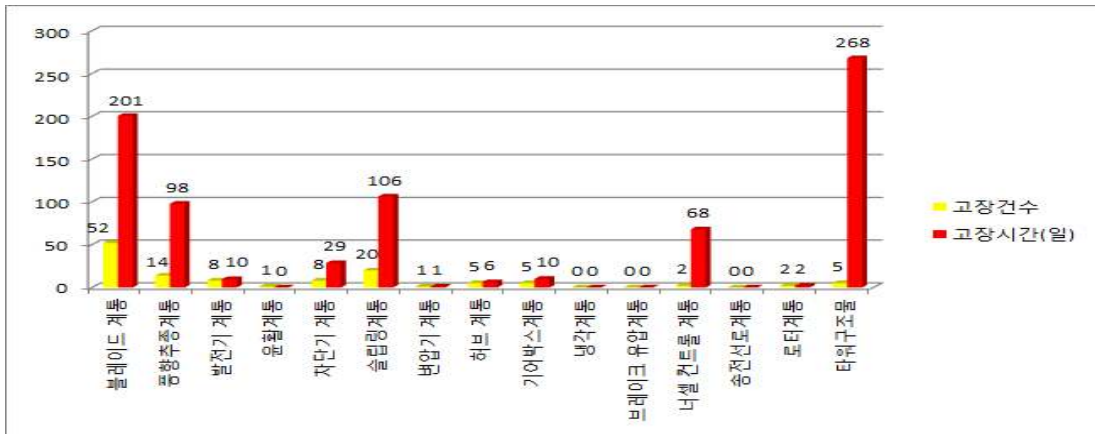


그림 23. B 지구 설비별 고장 빈도

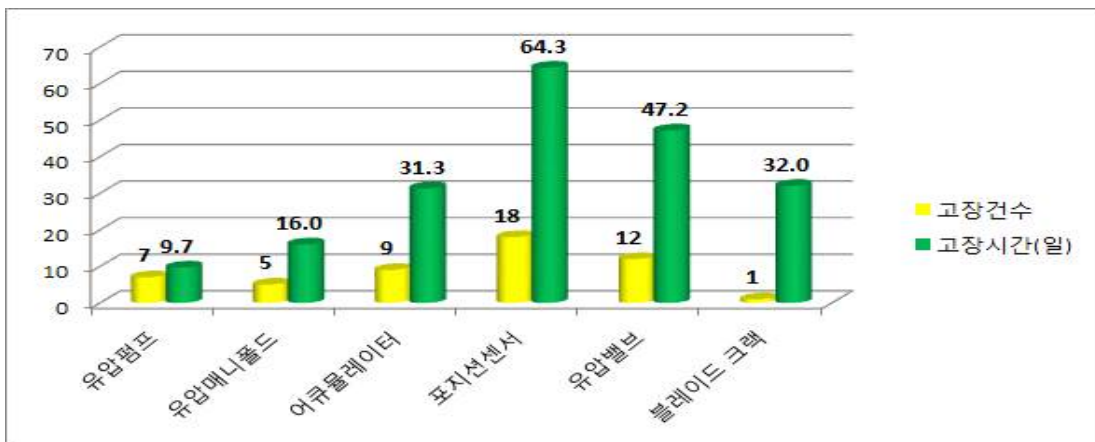


그림 24. 블레이드 계통 주요 고장 부위

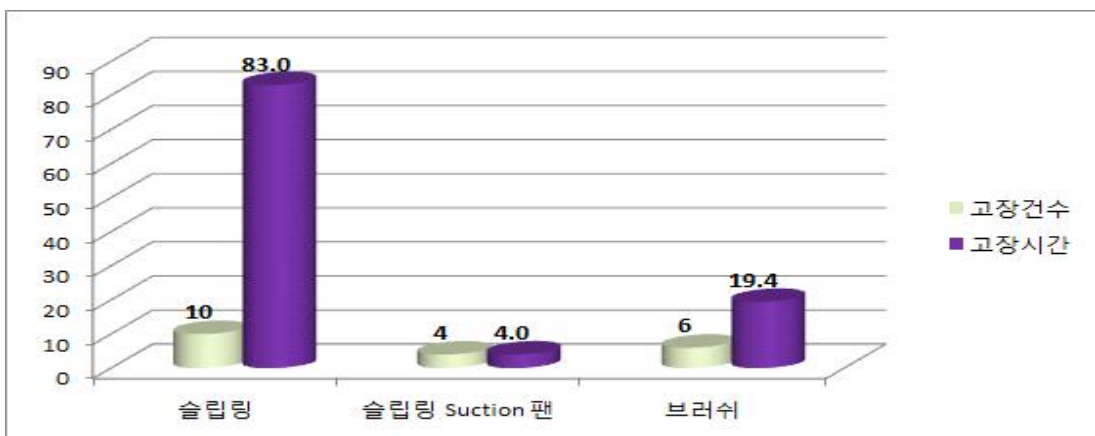


그림 25. 슬립링 계통 주요 고장 부위

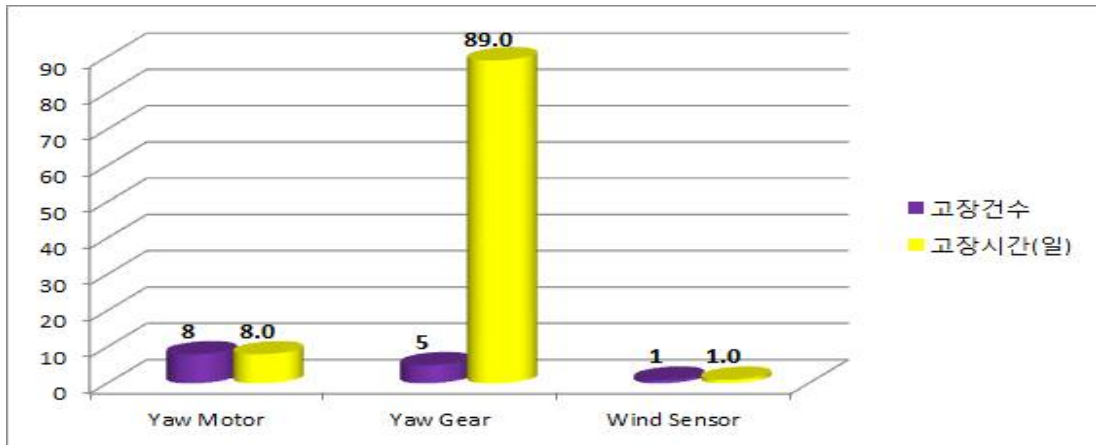


그림 26. 풍향추종 계통 주요 고장 부위

4) B 지구 주요 고장 원인 분석

(1) 블레이드 어큐뮬레이터 질소압 저하

A 지구와 동일하게 지속적인 피치 변화 및 유압 오일 충·방전으로 피로 누적에 의한 어큐뮬레이터 내부 블레더에 핀홀이 생기거나 접속부에서 내부 질소가 미세하게 리크 되는 현상이 발생하여 고장 정지가 되는 것으로 분석되었다.

(2) 타워 기초 진동에 의한 정지

B 지구의 경우 위 계통에 외에 타워 진동 발생에 의한 고장 정지가 장기간 발생되었다. 정밀점검 결과 타워 하부 EMBED 플랜지와 주변 전단보강의 접합부 이격으로 EMBED 플랜지에서 하부 기초콘크리트 유효층이 22cm으로, EMBED STEEL과 기초콘크리트 접합부 이격을 예상하지 못하고 설계되어, 실제 연직하중은 접합면을 통해 분배되지 못하고 대부분 EMBED 플랜지 하단에서 분배되는 상태로, 기초구조물 유효층 부족에 따른 안전성 미확보 상태이며, 또한 엠베드 플랜지 주변 전단보강 철근 U-BAR의 여장도 근접되게 설계되어 여장부족으로 전단보강근의 역할을 수행하기에는 미흡하게 설계된 것으로 분석되어 설계상 하자로 분석되었고, EMBED 플랜지와 주변 전단보강근 U-BAR가 근접되어 있고

사이 여장의 폭이 적어 시공여건상 콘크리트 타설시 채움 부족이 발생하여, 시공 시 공극이 발생한 시공 하자로 분석되었다 [12].

5) C 지구 설비별 고장 빈도 분석

C 지구의 고장 빈도를 설비별로 분석하여 보면 발전기 계통에서 가장 많이 발생하였으며, 다음으로 블레이드계통과 변압기 계통에서 고장이 많은 것으로 분석되었다. 설비별 고장 빈도 상위 세 계통, 발전기 계통, 블레이드 계통, 변압기 계통을 좀 더 구체적으로 살펴보았다. 그림 28은 발전기 계통의 주요 고장 부위이다. 발전기 리드 와이어에서 가장 많은 고장이 발생하였고, 냉각 팬 모터, VCS-TRU 카드 등에서 고장이 주로 발생한 것으로 분석되었다.

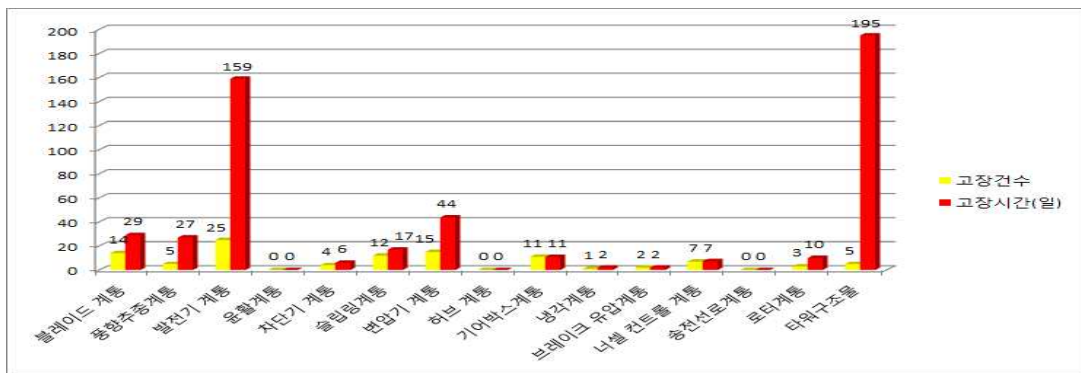


그림 27. C 지구 설비별 고장 빈도

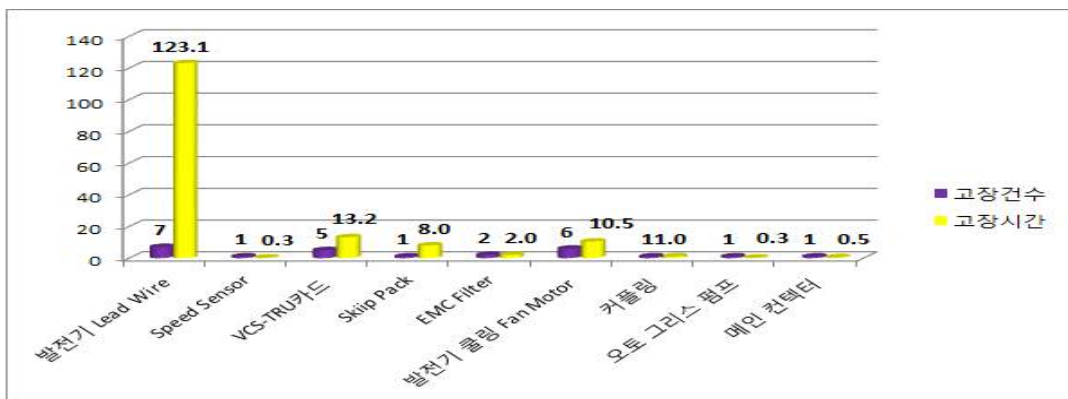


그림 28. 발전기 계통 주요 고장 부위

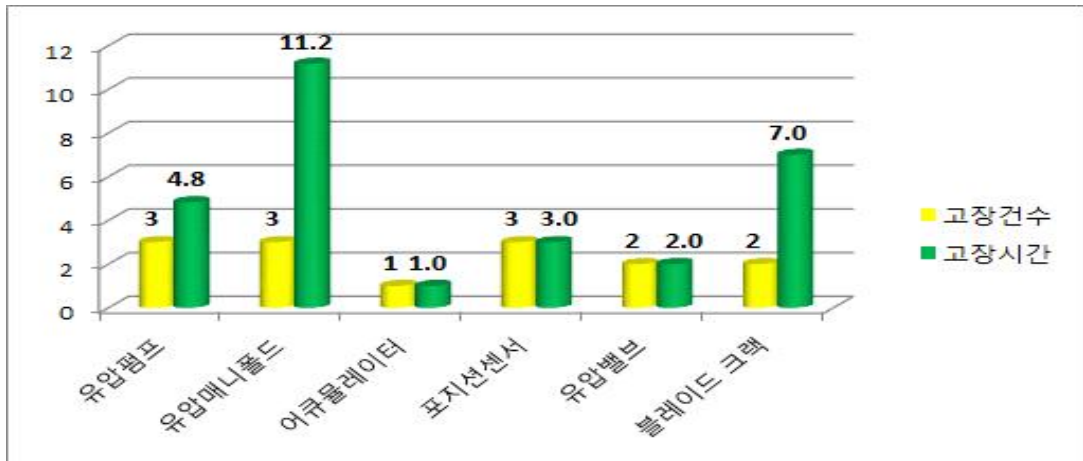


그림 29. 블레이드 계통 주요 고장 부위

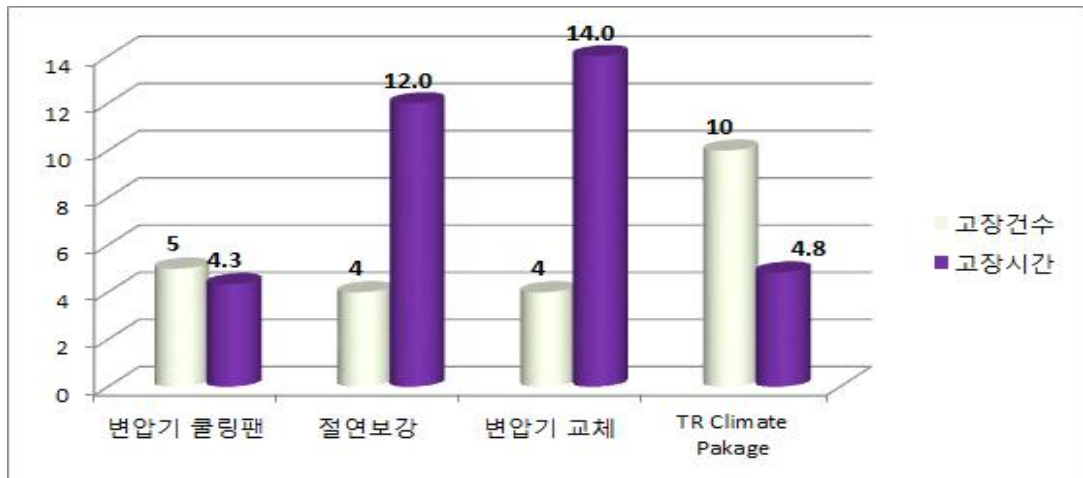


그림 30. 변압기 계통 주요 고장 부위

블레이드 계통의 주요 고장 부위는 그림 29와 같다. 유압펌프, 매니폴드 블레이드 포지션 센서, 유압밸브 등에서 고장이 주로 발생하였으며, 발생 빈도의 차이는 크지 않은 것으로 분석되었다.

변압기 계통의 주요 고장 부위는 그림 30과 같다. 변압기 교체 및 절연보강 냉각팬, TR Climate Package 등에서 주로 발생하였으며, 주로 변압기 절연 저하에 따른 절연 보강 및 변압기 교체에 따른 고장 정지로 분석되었다.

6) C 지구 주요 고장 원인 분석

(1) 변압기 절연 저하에 의한 발전기 정지

표 7. 지구별 변압기 사양 [11],[13]

| | A 지구 | B 지구 | C지구 |
|-------|--------|--------|--------|
| 타입 | 몰드형 건식 | 몰드형 건식 | 몰드형 건식 |
| 온도 등급 | F | F | F |
| 환경 등급 | E2 | E2 | E2 |
| 기후 등급 | C2 | C2 | C2 |

표 8. 2014년 지구별 날씨 현황 [14]

| 지 구 | 비 또는 안개가 낀 일수 |
|------|---------------|
| A 지구 | 165일 |
| B 지구 | 165일 |
| C 지구 | 147일 |



(a) (b) (c)

그림 31. (a) A 지구, (b) B 지구, (c) C 지구 변압기 실

C 지구의 경우 A, B 지구와 다르게 변압기 절연 저하에 의한 고장 발생이 많은 것으로 분석되었다. 표 7을 통해 A, B, C 세 지구의 변압기 사양이 같음을 확인할 수 있다. 또한, 지구별 날씨 역시 A, B 지구가 C 지구보다 오히려 비 또는 안개 낀 일수가 많은 것으로 확인되어 습분에 의한 변압기 절연 저하는 A, B 지구가 더 높을 것으로 분석되었다.

변압기 실 구조를 살펴보았다. 그림 31은 변압기 실 위치를 나타낸다. A 지구는 타워 하부 지하에 위치하여 있고 B 지구는 너셀 후단에 위치하여 있으나 바닥이 밀폐된 구조로 되어있다. 그러나 C 지구의 경우 변압기 실 하부가 2단 구조로 되어 있긴 하나 개방된 구조로 되어 있어 개방 공간으로 외부 공기가 직접 유입되어 변압기 절연 저하의 문제가 발생 한 것으로 분석되었다.

(2) 타워 기초 진동에 의한 정지

정밀점검 결과 B 지구와 동일하게 설계 및 시공 하자에 의한 타워 기초 진동 발생으로 발전기가 정지한 것으로 분석되었다 [12].

7) A, B, C 지구 공통 고장 원인 분석

풍력발전기는 연 1회 주기적으로 유지 보수를 시행한다. 유지 보수 시행 시 오일, 필터, 윤활유 등의 소모품을 교체하며, 볼트 및 케이블 단자대 등을 점검한다. 그러나 세 지구의 경우 주기적인 유지 보수를 시행하지 않아 소모품 등을 적기 교체하지 못하였고, 케이블 단자대 등을 점검하지 못하여 오일 부족, 케이블 풀림 등으로 발전기 고장 정지가 발생한 것으로 분석되었다.

V. 지구별 단지운영 개선방안 및 전력손실량 해석

5.1 지구별 개선 방안

1) A 지구 개선방안

(1) 블레이드 어큐물레이터 질소 충전 방법 개선

풍력발전기 어큐물레이터는 운전 시 블레이드 각도 유지를 위한 적정압력 유지 및 유압 오일 충·방전 시 급격한 압력 변화를 방지하는 완충역할을 하며, 정기 유지 보수 혹은 압력 저하에 의한 발전기 정지 시 질소를 충전한다. 그러나 어큐물레이터는 타워 상부 허브에 위치하여 있어 질소 충전 시 질소통을 타워 상부까지 옮겨야 하고 어큐물레이터를 고정하고 있는 지지대를 분리해야 하는 등 질소 충전 작업 자체는 간단하나 준비 시간이 오래 걸리는 문제가 있다. 따라서 질소 충전 방법을 그림 32처럼 개선하였다. 충전 호스를 타워 내부 사다리에 상시 부착하고(a) 어큐물레이터 접속부 커넥터를 제작하여(b) 질소통을 허브로 옮기지 않고 타워 하부에서 바로 연결 가능토록 하였고(c) 어큐물레이터 지지대를 분리하는 작업을 생략하도록 하였다.

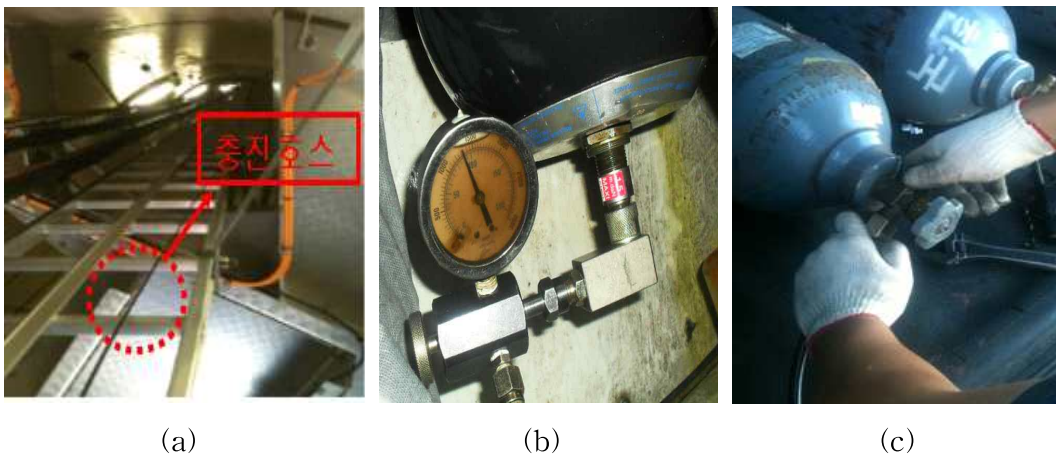


그림 32. 어큐물레이터 질소 충전 방법 개선

(2) 풍향·풍속계 타입 변경

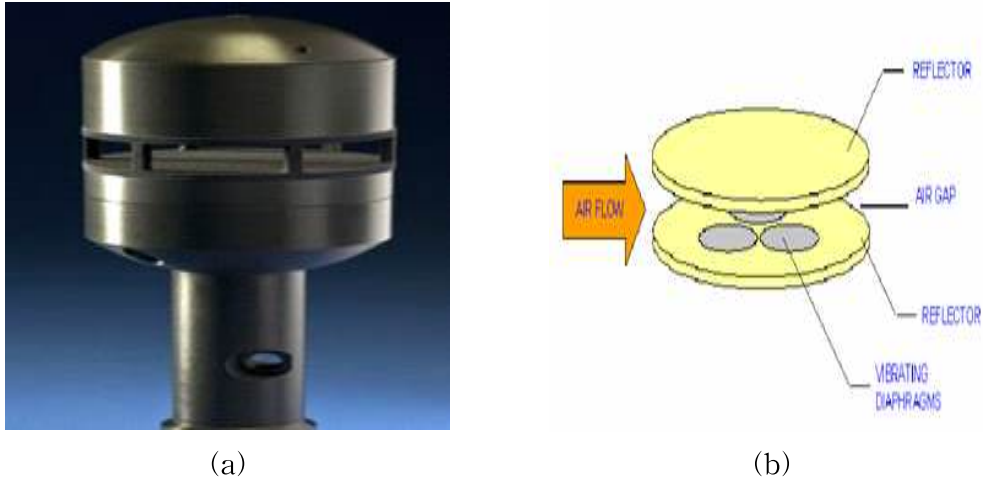


그림 33. (a) 초음파 타입 풍향·풍속계, (b) 측정원리

A 지구의 풍향·풍속계는 기계식으로 외부 염분, 습분 등에 의한 베어링 고착 등의 문제가 많이 발생한 것으로 분석되었다. 그러나 B, C 지구의 풍향·풍속계는 초음파 타입을 적용하여 염분, 습분 등에 의한 문제가 전혀 발생하지 않았다. 그 이유는 초음파타입의 측정원리가 두 개의 반사판(Reflector) 사이의 공기 흐름이 있으면 초음파가 발생하고 그것을 진동 격막(Vibrating Diaphragms)에 의해 전기적인 신호를 발생하여 주 제어기로 보내는 방식이기 때문이다.

(3) 블레이드 매니폴드 재질 개선

A 지구는 B, C 지구와 다르게 블레이드 매니폴드의 균열에 의한 고장이 많이 발생하였다. 이는 A 지구 매니폴드의 재질의 강도가 낮아 발생하는 것으로 분석되었다. 표 9는 지구별 매니폴드 재질을 비교한 것이다. A 지구의 매니폴드 재질의 강도가 B, C 지구보다 낮음을 알 수 있다. 실제 B, C 지구에서는 매니폴드 균열에 의한 고장 정지 발생이 없었다.

표 9. 지구별 블레이드 매니폴드 재질 비교

| | 재질 | 인장강도(Mpa) | 항복강도(Mpa) |
|---------|--------|-----------|-----------|
| A 지구 | AL7075 | 276 | 145 |
| B, C 지구 | SS400 | 400 | 245 |

(4) 블레이드 매니폴드 커버 구조 개선

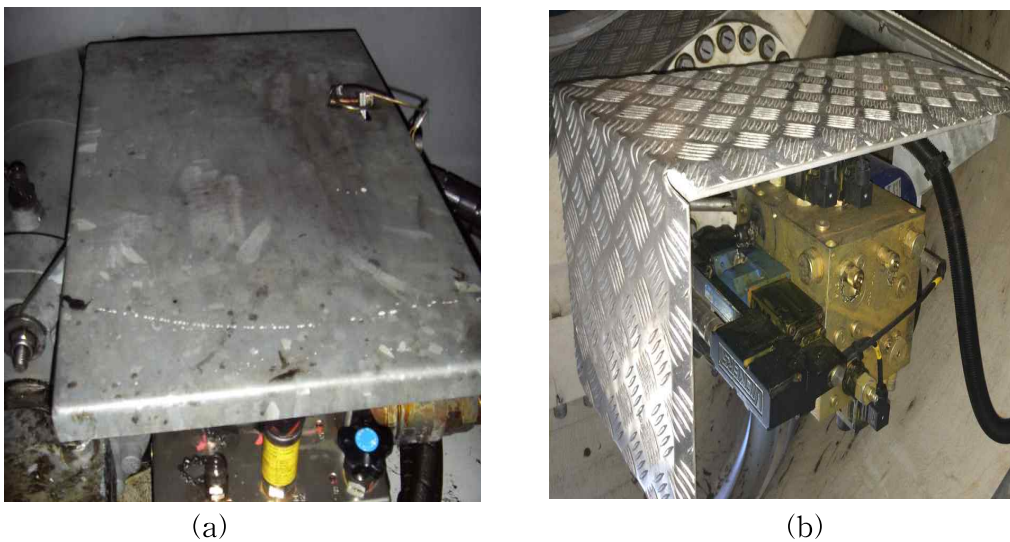


그림 34. (a) A 지구 매니폴드 커버, (b) B, C 지구 매니폴드 커버

블레이드 매니폴드는 매니폴드의 밸브나 전송기 등을 보호하기 위하여 커버가 설치되어 있으며, 또한 허브에 위치하여 있어 운전 시 계속 회전을 하게 된다. 따라서 원심력과 내부 진동 등에 의하여 커버가 이탈하는 사고가 발생하였고, 그로 인하여 2차사고로 이어지는 것으로 분석되었다. 그림 34를 보면 A 지구와 B, C 지구의 차이점을 확인할 수 있을 것이다. A 지구는 고정 볼트 하나로 커버를 지지하는 반면 B, C 지구는 견고하게 여러 개의 고정 볼트로 지지하고 있다. A 지구 블레이드 매니폴드 커버 이탈에 의한 고장 정지 시간이 약 400 시간에 이르렀으며 B, C 지구는 커버 이탈에 의한 고장 정지가 없는 것으로 분석되었다.

(5) 주요 정비예비품 확보

표 10. A 지구 다빈도 고장 주요 예비품

| 설비 계통 | 주요 예비품 |
|---------|---------------------------------------|
| 블레이드 계통 | 유압 매니폴드, 유압오일, 유압펌프, 어큐뮬레이터 포지션 센서 |
| 풍향추종 계통 | 요 브레이크 캘리퍼, 매니폴드, 풍향·풍속계, 요 모터 |
| 기어박스 계통 | 기어오일, 모터, 펌프 |

A 지구의 경우 2004 ~ 2014년 사이 고장 정지 후 자재조달 시간이 약 18,000 시간에 이른 것으로 분석되었다. 정비를 함에 있어 예비품의 유무는 정비 시간을 단축하는 가장 중요한 요소 중 하나이다. 그러나 현실적으로 모든 예비품을 확보할 수 없으므로, 그림 19 ~ 그림 20의 주요 고장 부위 분석을 통하여 표 10과 같이 주요 예비품을 도출하였다.

(6) 정기 유지보수 적기 시행

정기 유지보수는 주기적으로 발전기를 정지하여 풍력 발전기의 소모품(오일, 필터, 윤활유 등)을 교체하거나 볼트 고정상태 점검, 케이블 단자 연결 확인, 또는 브러쉬 상태 확인 후 교체 하는 등의 작업을 하는 것을 말한다. 제작사에서는 1년 주기로 유지보수를 시행하며, 경과 년수에 따라 유지보수 항목이 조금씩 다르다. 정기 유지보수를 적기에 시행하였을 경우 약 1,300여 시간의 발전기 고장 정지 시간을 단축할 수 있는 것으로 분석되었다.

(7) 실시간 감시 시스템 구축

A, B, C 지구는 아직까지 24시간 실시간으로 감시할 수 있는 인적 시스템이 구축되어 있지 않아, 휴일 등에 정지 시 고장 정지 지연 확인으로 인한 발전기 추가 정지 시간이 약 744 시간에 이른 것으로 분석되었다.

2) B 지구 개선 방안

(1) 주요 정비예비품 확보

B 지구의 경우 2010 ~ 2014년 사이 고장 정지 후 자재조달 시간이 약 6,900여 시간에 이른 것으로 분석되었으며, 표 11은 B지구 설비별 고장 빈도를 분석한 다빈도 고장 주요 예비품 목록이다. 그림 24 ~ 그림 26의 B 지구 주요 고장 부위 분석을 통하여 주요예비품을 도출하였다.

표 11. B 지구 다빈도 고장 주요 예비품

| 설비 계통 | 주요 예비품 |
|---------|----------------------------|
| 블레이드 계통 | 포지션 센서, 유압밸브, 어큐물레이터, 유압펌프 |
| 풍향추종 계통 | 요 모터, 요 기어 |
| 슬립링 계통 | 슬립링, 브러쉬 |

(2) 설계 및 시공 시 감독 철저

B 지구 1호기는 시공사 설계 및 시공하자에 의한 문제로 타워 기초에 진동이 발생하여 약 6,000 시간 이상 발전기가 정지하였다. 또한, 2, 3, 5 호기의 경우도 추가 정밀점검 결과 일부 타워 기초 보강공사가 필요하여 각각 약 100 시간 가까이 정지한 것으로 분석되었다.

(3) 블레이드 어큐물레이터 질소 충전 방법 개선

A 지구와 동일하게 타워 내부 사다리에 질소 충전 호스를 상시 부착하고 어큐물레이터 접속부의 충전 커넥터를 맞춤 제작한 질소 충전 방법 개선으로 약 22 시간의 정지 시간을 단축 할 수 있는 것으로 분석되었다.

(4) 정기 유지보수 적기 시행

정기 유지보수를 적기 시행하지 못하여 오일 및 윤활유 부족, 케이블 풀림 등으로 발전기 정지가 발생하였다. 정기 유지보수 적기 시행하였을 경우 약 415 시간의 발전기 정지 시간을 단축 할 수 있는 것으로 분석되었다.

(5) 실시간 감시 시스템 구축

휴일 등에 발전기 정지 시 고장 정지 지연 확인으로 인한 발전기 추가 정지 시간이 약 190 시간에 이른 것으로 분석되었다.

3) C 지구 개선 방안

(1) 주 변압기 실 구조 개선

C 지구의 경우 주 변압기 실 하부의 열린 공간으로 외부 습분 유입으로 변압기 절연 저하에 의한 고장이 발생되어 변압기 실 격실 하부에 강판을 설치하여 외부 공기의 직접 유입 차단이 필요한 것으로 분석되었다.

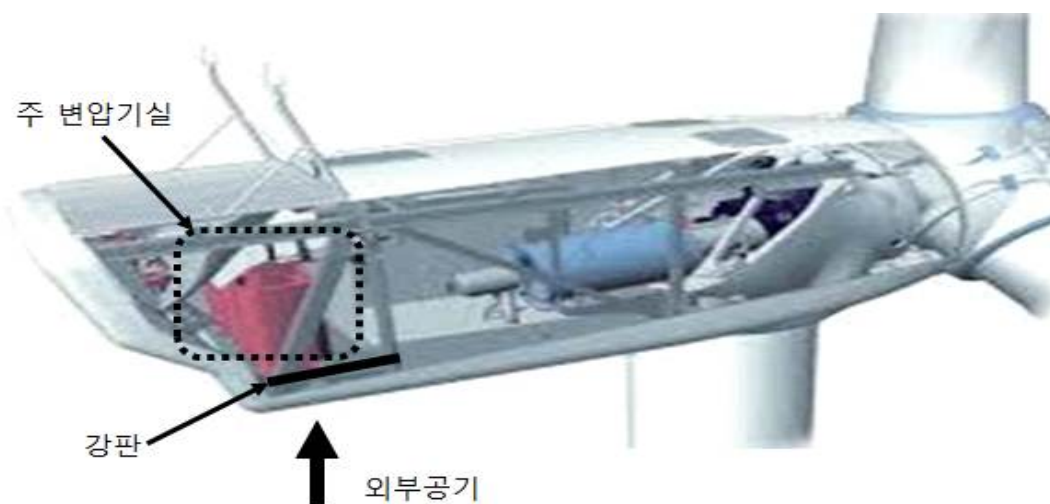


그림 35. 주 변압기 실 강판 추가설치

(2) 주요 정비예비품 확보

C 지구의 경우 2011 ~ 2014년 사이 고장 정지 후 자재조달 시간이 약 2,700여 시간에 이른 것으로 분석되었다. 표 12는 C 지구 설비별 고장 빈도를 분석한 다빈도 고장 주요 예비품 목록이다. 그림 28 ~ 그림 30의 주요 고장 부위 분석을 통하여 주요 예비품을 도출하였다.

표 12. C 지구 다빈도 고장 주요 예비품

| 설비 계통 | 주요예비품 |
|---------|---------------------------------|
| 블레이드 계통 | 포지션 센서, 유압펌프, 유압매니폴드, 유압밸브 |
| 발전기 계통 | 발전기 Lead Wire, 쿨링 팬 모터, VCS-TRU |
| 변압기 계통 | 변압기 쿨링팬, 변압기 |

(3) 설계 및 시공 시 감독 철저

C 지구 5호기는 B 지구 1호기와 동일하게 시공사 설계 및 시공하자에 의한 문제로 타워 기초에 진동이 발생하여 약 4,000 시간 이상 발전기가 정지하였다. 또한, 1, 4, 6 호기의 경우도 추가 정밀점검 결과 일부 타워 기초 보강 공사가 필요하여 각각 약 100 시간 가까이 정지한 것으로 분석되었다.

(4) 정기 서비스 적기 시행

정기 유지보수를 적기 시행하지 못하여 오일 및 윤활유 부족, 케이블 풀림 등으로 발전기 정지가 발생하였다. 정기 유지보수 적기 시행하였을 경우 약 100 시간의 발전기 정지 시간을 단축 할 수 있는 것으로 분석되었다.

(6) 실시간 감시 시스템 구축

휴일 등에 발전기 정지 시 고장 정지 지연 확인으로 인한 발전기 추가 정지 시간이 약 64 시간에 이른 것으로 분석되었다.

5.2 지구별 전력 손실량 해석

1) A 지구 전력 손실량 해석

표 13은 고장 정지에 의한 연도별 전력 손실량을 나타낸 것이다.

$$\text{전력손실량} = \text{고장정지시간}(hr) \times \text{이용률}(\%) \times \text{단위용량}(kW) \quad (3)$$

여기서 이용률은 A 지구 연평균 이용률을 적용하였으며, A 지구 풍력발전기 단위용량은 1,500 kW 이다.

표 14는 고장정지에 의한 설비별 전력 손실량을 나타낸 것이다. 전력 손실량 계산은 연도별 손실량과 동일한 식으로 산출하였으며, 단, 이용률은 2004년 ~ 2014년까지의 단지 평균 이용률을 적용하여 전체 전력 손실량은 연도별 전력 손실량과 비교하여 약간의 오차가 발생하였다.

표 13. A 지구 연도별 전력 손실량

| 연도 | 고장정지시간(hr) | 이용률(%) | 손실량(kw) |
|-------|------------|--------|------------|
| 2004년 | 772 | 23.68 | 274,214 |
| 2005년 | 958 | 35.55 | 510,854 |
| 2006년 | 2,153 | 33.57 | 1,084,143 |
| 2007년 | 3,619 | 30.52 | 1,656,778 |
| 2008년 | 1,968 | 28.64 | 845,453 |
| 2009년 | 3,654 | 28.37 | 1,554,960 |
| 2010년 | 3,264 | 26.86 | 1,315,066 |
| 2011년 | 6,803 | 23.37 | 2,384,792 |
| 2012년 | 4,152 | 26.1 | 1,625,508 |
| 2013년 | 1,848 | 30.53 | 846,292 |
| 2014년 | 1,584 | 28.45 | 675,972 |
| 합 계 | | | 12,774,032 |

표 14. A 지구 설비별 전력 손실량

| 설비 | 고장정지시간(hr) | 단지 평균 이용률(%) | 손실량(kW/h) |
|-----------|------------|-----------------|------------|
| 블레이드 계통 | 12,875 | 28.51 | 5,505,994 |
| 풍향추종계통 | 3,461 | 28.51 | 1,480,097 |
| 발전기 계통 | 3,274 | 28.51 | 1,400,126 |
| 운할계통 | 48 | 28.51 | 20,527 |
| 차단기 계통 | 344 | 28.51 | 147,112 |
| 슬립링계통 | 564 | 28.51 | 241,195 |
| 변압기 계통 | 192 | 28.51 | 82,109 |
| 허브 계통 | 1,116 | 28.51 | 477,257 |
| 기어박스계통 | 4,006 | 28.51 | 1,713,166 |
| 발전기 냉각계통 | 328 | 28.51 | 140,269 |
| 브레이크 유압계통 | 457 | 28.51 | 195,436 |
| 너셀 컨트롤 계통 | 243 | 28.51 | 103,919 |
| 송전선로계통 | 72 | 28.51 | 30,791 |
| 로터계통 | 1,468 | 28.51 | 627,790 |
| 합 계 | | | 12,164,780 |

2) B 지구 전력 손실량 해석

표 15는 고장 정지에 의한 연도별 전력 손실량을 나타낸 것이다. 산출식은 식 (3)과 같으며 단, B 지구 풍력발전기 단위용량 3,000 kW를 적용하였다. 표 16은 고장정지에 의한 설비별 전력 손실량을 나타낸 것이다. 전력 손실량 계산은 연도별 손실량 산출식과 동일하나 이용률은 2010년 ~ 2014년 까지의 단지 평균 이용률을 적용하여 전체 전력 손실량은 연도별 전력 손실량과 비교하여 약간의 오차가 발생하였다.

표 15. B 지구 연도별 전력 손실량

| 연도 | 고장정지시간(hr) | 연평균 이용률(%) | 손실량(kW/h) |
|-------|------------|------------|------------|
| 2010년 | 3,456 | 26.31 | 2,727,821 |
| 2011년 | 6,899 | 26.16 | 5,414,335 |
| 2012년 | 4,416 | 23.18 | 3,070,886 |
| 2013년 | 3,648 | 27.94 | 3,057,754 |
| 2014년 | 648 | 26.83 | 521,575 |
| 합 계 | | | 14,792,371 |

표 16. B 지구 설비별 전력 손실량

| 설 비 | 고장정지시간(hr) | 단지 평균 이용률(%) | 손실량(kW/h) |
|-----------|------------|--------------|------------|
| 블레이드 계통 | 4,812 | 25.61 | 3,697,060 |
| 풍향추종계통 | 2,352 | 25.61 | 1,807,042 |
| 발전기 계통 | 234 | 25.61 | 179,782 |
| 운환계통 | 4 | 25.61 | 3,073 |
| 차단기 계통 | 684 | 25.61 | 525,517 |
| 슬립링계통 | 2,554 | 25.61 | 1,962,238 |
| 변압기 계통 | 24 | 25.61 | 18,439 |
| 허브 계통 | 149 | 25.61 | 114,477 |
| 기어박스계통 | 240 | 25.61 | 184,392 |
| 너셀 컨트롤 계통 | 1,632 | 25.61 | 1,253,866 |
| 로터계통 | 48 | 25.61 | 36,878 |
| 타워기초 | 6,432 | 25.61 | 4,941,706 |
| 합 계 | | | 14,724,470 |

3) C 지구 전력 손실량 해석

표 17은 고장 정지에 의한 연도별 전력 손실량을 나타낸 것이다. 산출식은 식 (3)과 동일하나 C 지구 풍력발전기 단위용량 2,000 kW를 적용하였다. 표 18은 고장정지에 의한 설비별 전력 손실량을 나타낸 것이다. 전력 손실량 계산은 연도별 손실량 산출식과 같으나 이용률은 2011년 ~ 2014년 까지의 단지 평균 이용률을 적용하여 전체 전력 손실량은 연도별 전력 손실량과 비교하여 약간의 오차가 발생하였다.

표 17. C 지구 연도별 전력 손실량

| 연도 | 고장정지시간(hr) | 연평균 이용률(%) | 손실량(kW/h) |
|-------|------------|------------|-----------|
| 2011년 | 4,228 | 28.85 | 2,439,556 |
| 2012년 | 2,012 | 26.53 | 1,067,567 |
| 2013년 | 3,592 | 30.09 | 2,161,666 |
| 2014년 | 2,872 | 26.14 | 1,501,482 |
| 합 계 | | | 7,170,271 |

표 18. C 지구 설비별 전력 손실량

| 설비 | 고장정지시간(hr) | 단지 평균 이용률(%) | 손실량(kW/h) |
|-----------|------------|--------------|-----------|
| 블레이드 계통 | 696 | 27.60 | 384,192 |
| 풍향추종계통 | 648 | 27.60 | 357,696 |
| 발전기 계통 | 3,816 | 27.60 | 2,106,432 |
| 차단기 계통 | 144 | 27.60 | 79,488 |
| 슬립링계통 | 408 | 27.60 | 225,216 |
| 변압기 계통 | 1,170 | 27.60 | 645,840 |
| 기어박스계통 | 260 | 27.60 | 143,520 |
| 발전기 냉각계통 | 48 | 27.60 | 26,496 |
| 브레이크 유압계통 | 48 | 27.60 | 26,496 |
| 너셀 컨트롤 계통 | 176 | 27.60 | 97,152 |
| 로터계통 | 240 | 27.60 | 132,480 |
| 타워구조물 | 4,680 | 27.60 | 2,583,360 |
| 합 계 | | | 6,808,368 |

5.3 개선 방안 적용 시 지구별 기대효과 분석

개선 방안 적용 시 누적 단지 전체 평균 이용률이 A 지구 약 2.23% 상승하며 B 지구 약 2.13%, C 지구 약 2.62% 상승하는 것으로 분석되었다. 표 19, 표 20, 표 21은 개선 방안 적용 후 A, B, C 세 지구의 이용률 변화를 나타낸 것이다.

표 19. A 지구 개선방안 적용 후 이용률 변화

| 방안 | 정지 단축시 간 (hr) | 개선방안 적용시 발전량 증가분 (MW/h) | 단지누적 발전량 (MW/h) | 개선방안 적용시 누적 발전량 (MW/h) | 단지 평균 이용률 (%) | 개선 방안 적용시 단지 평균 이용률 (%) |
|-----------------------------|------------------------|-------------------------------------|-----------------------|------------------------------------|------------------------|---|
| 어큐플레이터 질소 충전 방법 개선 | 192 | 82 | 164,332 | 175,618 | 28.51 | 30.74 |
| 풍향·풍속계 타입 변경 | 213 | 91 | | | | |
| 주요 예비품 확보 | 18,021 | 7,707 | | | | |
| 24시간 모니터링 시스템 구축 | 744 | 318 | | | | |
| 정기서비스 적기시행 | 1,327 | 567 | | | | |
| 블레이드 매니폴드 커버 구조 개선 | 401 | 171 | | | | |
| 블레이드 매니폴드 재질 개선 | 5,493 | 2,349 | | | | |

표 20. B 지구 개선방안 적용 후 이용률 변화

| 방안 | 정지 단축 시간 (hr) | 개선방안 적용 시 발전량 증가분 (MW/h) | 단지누적 발전량 (MW/h) | 개선방안 적용 시 누적 발전량 (MW/h) | 단지 평균 이용률 (%) | 개선 방안 적용시 단지 평균 이용률 (%) |
|--------------------------|------------------------|--------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|------------------------|---|
| 주요 예비품 확보 | 6,941 | 5,333 | 171,441 | 182,178 | 25.61 | 27.73 |
| 어큐물레이터 질소 충전 방법 개선 | 22 | 17 | | | | |
| 설계 및 시공시 감독철저 | 6,408 | 4,923 | | | | |
| 정기 서비스 적기시행 | 415 | 319 | | | | |
| 24시간 모니터링 시스템 구축 | 189 | 145 | | | | |

표 21. C 지구 개선방안 적용 후 이용률 변화

| 방안 | 정지 단축 시간 (hr) | 개선방안 적용시 발전량 증가분 (MW/h) | 단지누적 발전량 (MW/h) | 개선방안 적용시 누적 발전량 (MW/h) | 단지 평균 이용률 (%) | 개선 방안 적용시 단지 평균 이용률 (%) |
|---------------------|------------------------|-------------------------------------|-----------------------|------------------------------------|------------------------|---|
| 변압기실 구조개선 | 1,170 | 599 | 193,369 | 197,815 | 25.61 | 28.23 |
| 주요 예비품 확보 | 2,734 | 1,400 | | | | |
| 설계 및 시공시 감독철저 | 4,608 | 2,360 | | | | |
| 정기 서비스 적기시행 | 105 | 54 | | | | |
| 24시간 모니터링 시스템 구축 | 64 | 33 | | | | |

표 22. 지구별 개선방안 적용 시 추가 이익

| | 개선방안 적용 시 발전량 증가분(kW/h) | SMP(원) | 개선방안 적용 시 추가 전력 판매금액(백만원) |
|------|-------------------------------|--------|---------------------------------|
| A 지구 | 11,286,111 | 150.8 | 1,702 |
| B 지구 | 10,736,993 | 204.0 | 2,190 |
| C 지구 | 4,446,408 | 214.5 | 954 |
| 합 계 | | | 4,846 |

※SMP(System Marginal Price) : 계통한계가격

$$\text{추가전력판매금액} = \text{발전량증가분} \times \text{SMP} \quad (4)$$

SMP는 A 지구 2004 ~ 2014년, B 지구 2010 ~ 2014년, C 지구 2011 ~ 2014년까지의 평균 SMP를 적용하였고, 그에 따른 추가 전력 판매금액은 각각 A 지구 약 1,702 백만원, B 지구 약 2,190 백만원, C 지구 약 954 백만원의 추가 이익을 확보할 수 있을 것으로 분석되었다.

VI. 결 론

본 논문에서는 풍력발전기 고장사례분석을 통하여 단지 운영 개선 방안을 도출하고자 하였다. 이에 제주도내 풍력발전단지 세 곳의 고장사례들을 분석하여 지구별 개선방안을 도출하였다.

A 지구의 경우 기계분야의 고장 빈도가 높았으며, 설비별 분석으로는 블레이드 계통, 풍향추종계통, 기어박스 계통에서의 고장 빈도가 높은 것으로 분석되었다. B 지구는 제어분야의 고장 빈도가 높았으며, 설비별 분석으로는 블레이드 계통, 슬립링 계통, 풍향추종계통에서의 고장 빈도가 높은 것으로 분석되었다. 마지막으로 C 지구는 전기 분야의 고장 빈도가 높았으며, 설비별 분석으로는 발전기 계통, 변압기 계통, 블레이드 계통에서의 고장 빈도가 높은 것으로 분석되었다.

본 논문의 고장 사례 분석을 통하여 지구별 특성에 따라 다른 개선방안이 도출되기도 하였고 공통적으로 적용 가능한 개선 방안의 도출도 확인할 수 있었다. 도출된 개선 방안 적용 시 A 지구 이용률이 2.23%, B 지구 이용률 2.13%, C 지구 이용률 2.62% 상승하는 것으로 분석되었으며, 그로 인한 추가 전력 판매금액 역시 A 지구 1,702 백만원, B 지구 2,190 백만원, C 지구 954 백만원, 합계 약 4,846 백만원의 추가 전력판매이익을 확보할 수 있을 것으로 분석되었다. 다만, A 지구의 경우 2004 ~ 2014년의 11년 동안의 다양한 고장 사례가 확보 가능하여 좀 더 신뢰성이 있는 분석이 가능하였으나 B 지구, C 지구의 경우 초기 2년간의 자료를 제작사에서 제공받지 못하여 실제 운전기간 보다 짧은 기간인 B 지구 2010 ~ 2014년, C 지구 2011 ~ 2014년 동안의 고장 사례만을 분석한 점은 아쉬운 점이다.

본 논문에서 제시한 연구방법과 도출된 결과를 활용하여 A, B, C 지구의 발전기 타입과 동일한 풍력발전단지에 개선 방안을 적용한다면 단지 이용률 향상에 기여할 수 있을 것으로 판단되며, 추가적으로 다른 종류의 발전기와 발전단지 별 고장사례를 조사하여 면밀히 분석한다면 보다 신뢰성 높고 향상된 방법의 연구 성과가 추가될 것이라 생각 된다.

참 고 문 헌

- [1] 류구현, “기상관측자료를 이용한 한경풍력단지의 풍력발전량 예측에 관한 연구”, 2009. 06.
- [2] 제주특별자치도, “제주형 저탄소 녹색성장 Carbon Free Island Jeju by 2030”, 2012.05.
- [3] Vestas Technology Department, Service Training 2005.
- [4] 송승호, “세계 풍력발전 현황과 기술동향”, 2011.05.
- [5] Wind Energy Association, www.wwindea.org.
- [6] REN21, “RENEWABLES 2015 GLOBAL STATUS REPORT”, 2015.
- [7] 에너지 경제 연구원, “세계 에너지 시장 인사이트”, 제15-21호, 2015.
- [8] 한국풍력산업협회, www.kweia.or.kr.
- [9] 기상청 자료 관리 서비스팀, “풍력자원지도 연구 개발 보고서”, 2007.
- [10] 삼성중공업, “풍력발전 技術概要 및 動向”, 2009.
- [11] NEG Micon A/S, “Operaton & maintenance Manual NM&72C/1,500”, 2003.
- [12] (주)정우구조엔지니어링, “제주 풍력 기초구조물 정밀안전진단 용역”, 2013.04.
- [13] Vestas Technology Department, “Technical Documentation-Class II”, 2005.06.
- [14] 제주지방기상청, <http://web.kma.go.kr/aboutma/intro/jeju>.

감사의 글

직장 생활을 병행하며 산업대학원 과정 석사학위를 취득하기는 생각보다 쉽지 않은 일이었습니다. 주변 분들의 도움이 없었다면 아마 이 자리가 없었을지도 모릅니다. 지면을 빌어 감사의 마음을 전하고자 합니다.

먼저 아무런 준비도 없었던 저를 이끌어주셔서 이 자리까지 오게 만들어주신 김호민 지도교수님께 진심어린 감사함을 전하고 싶습니다. 교수님의 지도와 가르침이 있었기에 본 논문을 무사히 마칠 수 있었습니다. 다시 한 번 감사합니다. 또한 교외업무로 바쁘신 와중에도 틈틈이 격려를 아끼지 않으신 김일환 교수님 감사합니다. 아울러 본 논문이 완성 될 수 있도록 세심한 심사와 아낌없는 조언을 해주신 김세호 교수님과 김호찬 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한 전기공학과를 졸업한지 10년 가까이 지났어도 반갑게 맞아주시고 아낌없는 격려를 해주신 오성보 교수님, 이개명 교수님께도 감사드립니다.

산업대학원 과정에서 많은 지도를 해주신 허종철 교수님과 고경남 교수님께도 감사드립니다. 그리고 갑자기 나타나서 이것저것 부탁만 했는데 묵묵히 들어준 지형과 연구실 식구들에게도 진심으로 고마운 마음을 전합니다.

회사의 지원 아래 무사히 교육과정을 마칠 수 있었습니다. 한국남부발전(주)에게도 감사드립니다. 또한 바쁜 업무 중에도 기꺼이 배려해주신 남제주화력 강영만 팀장님 이하 계전팀 직원들에게도 감사의 마음을 전합니다. 특히 BLR 제어파트 강봉조 부장님, 태운이형, 중훈이형 정말 죄송하고 감사합니다. 업무에 지장이 없도록 최대한 노력하려 했으나 본의 아니게 피해를 끼쳤는데도 아낌없는 격려와 조언에 다시 한 번 감사의 마음을 전합니다.

그리고 자신의 업무도 바쁠 텐데 많은 자료와 도움을 준 풍력운영팀 대원아, 석현아 고맙다. 또한 도움을 요청할 때마다 흔쾌히 자료를 제공해준 금화 PSC 송행철 대리, 최병욱 주임께도 감사한 마음을 전합니다.

논문 작성에 지칠 때 마다 늦은 밤에도 기꺼이 술 한 잔 같이하면서 용기를 북돋아준 태경이형 고맙습니다. 그리고 풍력운영팀에서 근무할 때부터 대학원, 이번 논문 준비까지 같이 하면서 함께 고생한 인규형 고맙습니다.

언제나 저의 뒤를 묵묵히 응원해 주시는 아버지, 어머니 진심으로 감사합니다.

아버지, 어머니께서 계셔서 언제나 든든합니다. 또한 아낌없는 격려와 지원을 해주신 장인, 장모님께도 진심어린 감사함을 전합니다.

마지막으로 제 삶의 힘이 되어 주는 가족에게 고마움을 전하고 싶습니다. 논문에 바빠 가정에 신경 쓰지 못했음에도 항상 사랑을 주는 나의 아내 변윤경과 공룡을 좋아하는 장난꾸러기 아들 허대훈, 아빠 눈에는 항상 예쁜 딸 허가연에게 고맙고 사랑하며 앞으로 더 행복하자는 말을 전하고 싶습니다.

이외에 논문 제출을 마치고 졸업을 할 수 있게 도와주신 많은 분들께 일일이 감사함을 전하지 못하여 송구하게 생각하며 졸업을 계기로 앞으로 더 발전하는 모습으로 보답하도록 하겠습니다. 감사합니다.

2015년 12월

허 관 구 올림