



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

IEC TS 61400-26-1에 따른
풍력터빈의 가동률 산출 및 유효성 분석

濟州大學校 産業大學院

風力工學科

李 巷 九

2016年 2月

IEC TS 61400-26-1에 따른
풍력터빈의 가동률 산출 및 유효성 분석

指導教授 高 炘 男

李 巷 九

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2015年 12月

李巷九의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 최길현 
委 員 고정남 
委 員 김병석 

濟州大學校 産業大學院

2015年 12月

Wind Turbine Availability and Validity Analysis based on IEC TS 61400-26-1

Hang-Ku Lee

(Supervised by professor Kyung-Nam Ko)

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

2015 . 12 .

This thesis has been examined and approved.

후정철

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

Kyungnam KO

Thesis director, Kyung-Nam Ko, Prof. of Faculty of wind energy engineering

Bum-Suk Kim

Thesis director, Bum-Suk Kim, Prof. of Faculty of wind energy engineering

.....
Date

Department of Wind Energy Engineering
Graduate School of Industry
Jeju National University

목 차

목 차	i
List of Figures	iii
List of Tables	iv
Abstract	vi
I. 서 론	1
1. 연구배경	1
2. 연구동향	2
3. 연구목적	5
II. IEC TS 61400-26-1 개요	6
1. 정보범주 분류체계	6
1) 최대성능 발전	7
2) 부분성능 발전	8
3) 기술적 운전대기	9
4) 환경사양 외	9
5) 운전정지	10
6) 전기사양 외	11
7) 계획정비	12
8) 계획수정 조치	12
9) 강제정지	13
10) 중지	13
11) 불가항력	14
12) 비가용 정보	15

2. 가동률 계산 공식	15
1) 운전가동률	16
2) 기술가동률	18
III. 풍력발전 SCADA시스템 데이터 분석	20
1. 연구대상 풍력터빈	20
1) 가시리 국산화 풍력발전단지 개요	20
2) 연구대상 풍력터빈	20
2. SCADA시스템	22
3. SCADA시스템 데이터 분석	23
1) 에러로그 기록	23
2) 에러로그 기록에 대한 정보범주 분류 및 시간할당	24
3) 시간이 할당된 정보범주	32
IV. IEC TS 61400-26-1에 따른 SCADA 에러로그의 시간할당	36
1. 가동률 정의	36
2. 가동률 산출	37
1) 가동률 산출 결과	38
V. SCADA시스템과 IEC TS 61400-26-1에 근거한 가동률 비교	41
5.1 산출된 가동률과 SCADAGA동률 비교	41
5.1.1 1년 가동률 비교	41
5.1.2 월별 가동률 비교	42
VI. 결 론	45
참고문헌	47

List of Figures

Fig. 1	Variation of the technical availability start-value with year	3
Fig. 2	Distribution of average annual availability	4
Fig. 3	View of Gasiri Wind Farm	20
Fig. 4	Location of turbine No. 5 and No. 6	21
Fig. 5	SCADA System configuration	22
Fig. 6	Time allocation for each information category at turbine No.5 & No.6	31
Fig. 7	Ratio of each information category at turbine No.5	32
Fig. 8	Ratio of each information category at turbine No.6	32
Fig. 9	Each availability of turbines No.5 & No.6	36
Fig. 10	4 kinds of availability with month at turbine No. 5	37
Fig. 11	4 kinds of availability with month at turbine No. 6	38
Fig. 12	Comparison availabilities at turbine No.5	39
Fig. 13	Comparison availabilities at turbine No.6	40
Fig. 14	SCADA and technical availability with month at turbine No.5	40
Fig. 15	SCADA and technical availability with month at turbine No.6	41

List of Tables

Table 1 Overview of information category	6
Table 2 FULL PERFORMANCE category	7
Table 3 PARTIAL PERFORMANCE category	8
Table 4 TECHNICAL STANDBY category	9
Table 5 OUT OF ENVIRONMENTAL SPECIFICATION category	10
Table 6 REQUESTED SHUTDOWN category	11
Table 7 OUT OF ELECTRICAL SPECIFICATION category	11
Table 8 SCHEDULED MAINTENANCE category	12
Table 9 PLANNED CORRECTIVE ACTION category	12
Table 10 FORCED OUTAGE category	13
Table 11 SUSPENDED category	14
Table 12 FORCE MAEURE category	14
Table 13 INFORMATION UNAVAILABLE category	15
Table 14 Operational availability based on mandatory levels only	16
Table 15 Operational availability algorithm-including optional levels	17
Table 16 Turbine operational availability algorithm-including optional levels	18
Table 17 Technical availability algorithm	19
Table 18 Specifications at turbine No. 5 & No. 6	21
Table 19 Sample of error logs at turbine No.5	23
Table 20 Sample of error logs at turbine No.6	24
Table 21 Information categories at turbine No.5	25
Table 22 Event record at turbine No.5	27
Table 23 Time allocation for each error log event and information category at turbine No.5	28
Table 24 Information categories of turbine No.6	29
Table 25 Event record at turbine No.6	30
Table 26 Time allocation for each error log event and information category at No.6	31

Table 27 Distributed time to each information category at turbine No.5	32
Table 28 Distributed time to each information category at turbine No.6	32
Table 29 Time allocation to information categories	37

Abstract

Lots of studies have been performed for improving the availabilities of wind turbines. Although both wind turbine owners and manufacturers make efforts to improve the availabilities, the calculating methods for the availabilities may be different from each other, which may cause dispute between them. For this reason, IEC (International Electrotechnical Commission) issued the IEC TS 61400-26-1 in 2011 in which the methods of calculating the availability are stated in detail. However, there are very little studies about how the availabilities of wind turbines are in South Korea when the IEC TS is applied to wind turbines.

In this thesis, the availabilities of real wind turbines (No. 5 and No. 6) located in Jeju were derived in compliance with IEC TS 61400-26-1. For calculating the availabilities, the error and turbine status logs data, the working time data and the out of environmental time data of the two wind turbines were used, which were obtained from SCADA system. The operational availabilities and technical availabilities were computed and compared with those of SCADA system. The technical availabilities were 97.2 % for the No. 5 wind turbine and 98.0 % for the No. 6 wind turbine, while operational availabilities were 78.1 % ~ 78.7 % for the No. 5 wind turbine and 58.5 % ~ 61.0 % for the No. 6 wind turbine, which had big difference. The reason is as follows: the time for maximum performance production and technical suspension is regarded as working time for calculating technical availability, while suspension time is taken to turbine stop time for computing operational availability. The availabilities based on SCADA system were 97.0 % for the two turbines, while technical availabilities of No. 5 and 6 wind turbines were 97.2 % and 98.0 %, respectively, which were very similar. Finally, the calculation of availability based on the IEC TS was found to be very useful to assess the real wind turbine's operating situation fairly.

I. 서 론

1. 연구배경

석탄, 석유 등 자원의 고갈과 온실가스 배출 등 환경적 요인에 의하여 전 세계적으로 청정에너지인 풍력을 이용한 발전이 늘어가고 있는 추세이다. 전 세계 풍력발전 설비는 2004년부터 2013년 사이에 연간 25.3% 증가율을 보이며 19배 가까이 증가했고, 2013년에는 35GW를 추가하여 전년 대비 20.2% 증가한 누적설비용량 318GW에 이르렀다.[1]

무한히 잠재되어 있는 풍력의 보고인 해상풍력 발전의 용량은 현재 전 세계에 설치되어 있는 풍력발전의 불과 1%이다. 지금까지는 주로 북유럽의 국가에서 개발되었고, 북해와 발트해를 중심으로 20곳을 초과하는 프로젝트가 실시되고 있다.[2] 국내에서도 해상풍력을 포함하여 대규모 풍력발전단지들이 개발되고 있고 2013년 50.65MW가 설치되어 누적 설치용량은 2013년 말 기준으로 534MW에 이르고 있다.[3]

이렇게 개발되어진 풍력발전단지의 발전수입에 직접적인 영향을 끼치는 이용률은 발전단지의 풍속과 함께 가동률에 의해 좌우된다. 풍속은 조정이 불가능하지만 가동률은 운영자의 노력여하에 따라서 달라 지게 된다. 즉, 고장 시의 대응속도, 자재의 확보율, 예지보전(Predictive Maintenance) 및 사전조치 등에 의해 어느 수준 이상으로 가동률을 유지할 수 있다.

현재 외국에서의 육상풍력터빈은 전문 유지보수 인력에 의한 관리를 통하여 98% 이상의 가동률 수준을 보이고 있다.[4] 하지만 풍력터빈이 해상에 위치할 경우에는 접근의 한계 등으로 인하여 가동률이 낮게 된다.[5] 따라서 해상풍력터빈에 대한 접근성을 높이기 위한 방법 등 가동률을 향상시키기 위한 노력들이 시도되고 있다.

그리고, 신규 풍력발전단지에서는 설치된 풍력터빈의 성능을 평가하기 위한 풍력터빈 성능보증시험이 이루어지고 있고 성능평가 항목에는 출력성능 시험과 합

계 가동률이 포함된다.

이렇게 풍력발전단지의 운영 또는 풍력터빈의 성능시험을 위하여 가동률에 대한 중요성이 부각되고 있지만 가동률 산출에는 각기 다른 방법들이 적용되어져 왔다. 예를 들면, 풍력터빈의 가동률은 풍력터빈의 SCADA시스템에서 제공하는 가동률을 흔히 사용하고 있는데, 이 가동률은 풍력터빈 제작사 또는 SCADA시스템 제작사마다 서로 다른 방식으로 산출되어지고 있다.

그리고 성능평가를 위한 가동률 산정 시에도 계획예방정비를 위한 풍력터빈 정지가 계약 내용에 따라서 가동시간이 될 수도 있고 정지시간이 될 수도 있다.

2011년 IEC(International Electrotechnical Commission)에서는 풍력터빈의 가동률을 산출할 수 있는 IEC TS 61400-26-1을 제정하였다.[6],[7] 이를 통하여 보다 객관적이고 타당하게 가동률을 산출할 수 있게 되었다.

이에 따라서 IEC TS 61400-26-1에 근거한 가동률 산출방법의 유효성에 대한 연구가 필요하다 하겠다. 하지만 아직까지 국내에서는 관련 연구가 활발하게 이루어지지 못하고 있다.

본 연구는 실제 풍력터빈의 데이터를 이용하여 IEC TS 61400-26-1에서 제시하는 방법으로 가동률을 산출하고, 풍력터빈의 SCADA시스템의 가동률과 비교함으로써 IEC TS 61400-26-1에 의한 가동률 산출과 그 유효성에 대해서 분석해 보고자 한다.

2. 연구동향

1) 가동률 관련 연구

관련문헌에 따르면 풍력터빈의 신뢰도(Reliability)와 가동률(Availability)에 대해서 다음과 같이 정의하고 있다.

- 가동률은 신뢰도의 기능 중 하나이며 설계, 가동 환경 및 관리조건에 영향을 받는다.[8]
- 가동률은 풍력터빈이 원화하게 운전할 확률이며 그 가동률과 신뢰도의 주된 차이점은 시스템의 운영관리(O&M) 전략에 대한 것이다. 풍력터빈의 점검 횟수

를 줄임으로써 신뢰도는 높일 수 있지만, 관리 또는 고장에 대한 수리를 하지 않는 경우에 급기야는 아주 낮은 가동률을 얻게 될 수도 있다.[4]

신뢰도 또는 가동률이라는 용어는 주어진 풍력터빈 또는 풍력발전단지를 기술적 관점 하에 신뢰성 있게 운전하기 위한 능력을 설명하는데 사용되며, 풍력발전단지의 경제성을 위하여 가동률의 중요한 역할을 인지할 필요가 있다.[9] 신뢰도와 가동률은 고장율과도 관계가 있어서 풍력터빈의 각 부품들의 고장으로 인해 발생하는 정지시간에 대한 많은 연구들이 진행되고 있다.

독일의 각기 다른 지역에 설치된 250MW, 1,500기의 가동기간 15년까지의 풍력터빈에 대한 가동률 조사에서는 평균 약 98%의 우수한 가동률을 얻고는 있지만 유지보수에 대한 60,000개 이상의 보고서를 통하여 다수의 고장에 직면하고 있음을 알 수 있다. 고장에 의한 정지시간은 보수작업의 필요여부, 교체품의 확보여부, 유지보수팀의 기술력에 의해 좌우되며, 더 높은 풍력터빈의 신뢰성을 위해서 설계자들에게 보다 개선된 전기·전자부품을 요구하고 있다.[10]

Fig. 1은 캘리포니아의 초기 풍력터빈 가동률이 55%~65%이었던 것이 최근 30년 동안 풍력터빈의 가동률이 99% 가깝게 큰 폭으로 향상 된 것을 보여주며 이는 풍력터빈 모델의 기술력 향상에서 기인한다.[9]

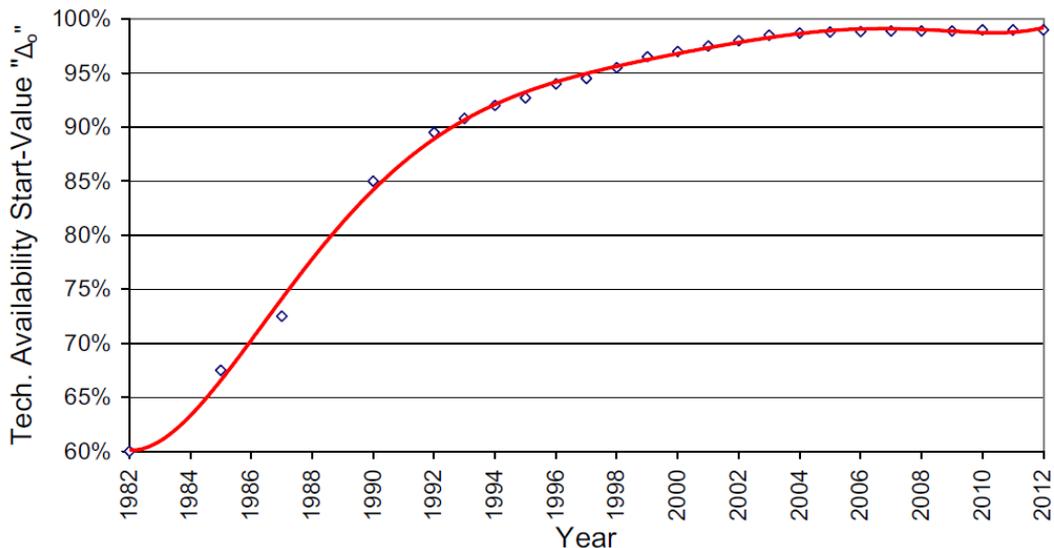


Fig. 1 Variation of the technical availability start-value with year[8]

Garrad Hassan에서 14,000MW 이상의 운전 중인 풍력발전단지 성능평가 경험을 바탕으로 한 조사에서는 수명기간 동안 기대되는 가동률에 주목하였고 Fig. 2와 같이 97%의 가동률이 현실적이라는 것을 보여주고 있다.[11]

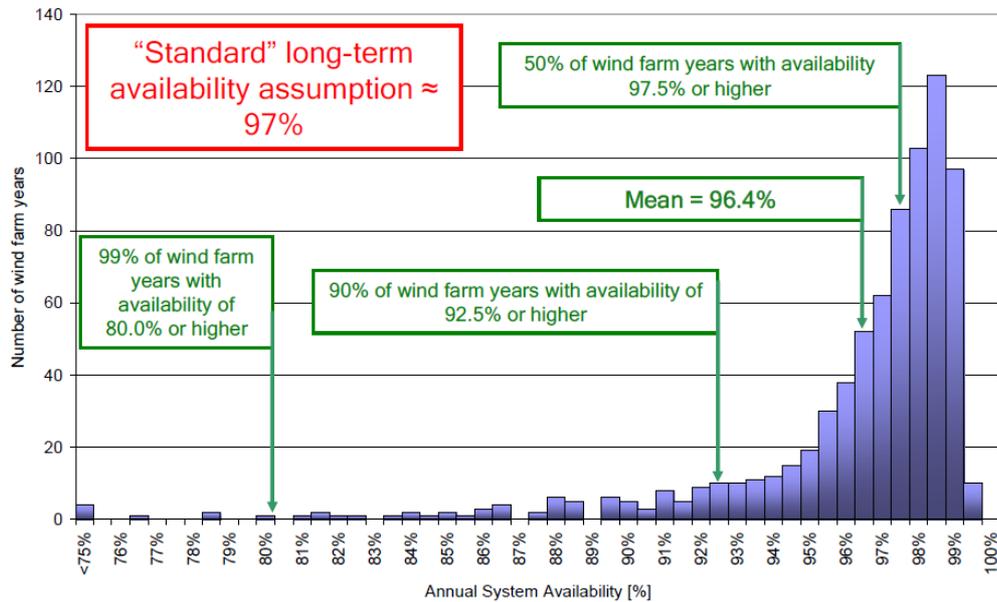


Fig. 2 Distribution of average annual availability[11]

육상풍력발전단지는 전문 유지보수 조직에 의한 관리를 통하여 이렇게 최상의 가동률 수준을 보이고 있다.[4]

하지만, 해상풍력에서는 접근의 한계와 유지관리 장비에 대한 제약에 의하여 수용할 수 없는 비가동 시간을 쉽게 야기하고, 이는 기타 다른 설계 파라미터들과 연관된 해상풍력단지의 유지관리(O&M) 요구에 대한 평가를 불가피하게 만든다.[25] 또한, 풍력발전기의 수명이 증가함에 따라 O&M 비용과 정지시간은 상승할 것이라 평가된다.[12]

다각적인 방면에서 O&M비용을 절감하면서 가동률을 높일 수 있는 방법들이 연구되어지고 있고, 이처럼 풍력발전기의 성능을 측정하는 중요한 척도로서 가동률이 활용되고 있다.

3. 연구목적

풍력발전단지의 경제성은 주로 이용 가능한 풍력량과 풍력터빈의 출력성능, 그리고 가동률에 의존한다.[27] 풍력발전단지 운영을 위해서는 무엇보다도 정지에 의한 손실을 줄여야 한다. 하지만 정지시간에 대한 관리는 쉽지 않다. 예방정비를 풍속이 낮은 기간에 실시하는 계획 등은 정지시간을 줄이고 가동률을 높이는 전략 중의 하나이다.[13]

그리고 풍력터빈의 가동률은 풍력단지와 터빈들을 서로 비교할 때 아주 유용하게 사용하는 성능의 척도이다.[24] 풍력단지 건설 또는 풍력터빈의 유지관리(O&M)계약에 반영되어 보증 가동률에 미달하는 경우에는 손실금액을 계약자에게 청구할 수도 있다.[26] 따라서 풍력발전단지 운영과 평가를 위해서는 무엇보다도 객관적이고 타당성 있게 가동률을 산정하는 것이 중요하다.

2011년 IEC에 의해 제정된 IEC TS 61400-26-1(풍력발전시스템의 시간에 기반하는 가동률)은 객관적이고 타당하게 가동률을 산출할 수 있는 방법과 절차가 될 수 있을 것이다.

따라서 이에 대한 유효성을 확인하기 위하여 IEC TS 61400-26-1에 근거한 가동률 산출방법에 대한 연구가 필요하지만 아직까지 국내에서는 관련 연구에 대한 논문이나 보고서가 없는 실정이다.

본 연구는 실제 풍력터빈의 운전기록 등의 데이터를 이용하여 IEC TS 61400-26-1에서 제시하는 방법으로 가동률을 산출하고, 풍력터빈의 SCADA시스템의 가동률과 비교함으로써 그 유효성에 대해서 분석해 보고자 한다.

II. IEC TS 61400-26-1 개요

1. 정보범주 분류체계[6],[7]

IEC TS 61400-26-1은 풍력터빈에 대한 시간에 기초하는 가동률을 산출하는 방법을 제시하고 있다. 이는 풍력발전시스템의 상태와 풍력터빈 내·외부 조건에 따른 각각의 사건에 대한 시간을 할당하기 위한 정보범주(Information category)의 분류체계를 이용하는 것이다.

Table 1. Overview of information category

정보 범주					
필수레벨 1	필수레벨 2	필수레벨 3	필수레벨 4	우선순위	선택레벨 5
가용정보	운전	발전	최대성능 발전	1	
			부분성능 발전	2	정격출력 감소 성능감소
		비발전	기술적 대기	3	
			환경사양 외	4	시동풍속 이하 기타 환경
			운전정지	5	
			전기사양 외	6	
	비발전	계획정비		7	
		계획수정조치		8	개조 개선 기타 시정조치
		강제정지		9	응답 진단 물류 고장수리
		중지		10	계획 정비 계획수정조치 강제정지
			불가항력	11	
	비가용정보				12

Table 1은 풍력발전시스템의 상태와 내·외부 조건에 기초하여 시간을 할당할 수 있는 일반적 정보범주를 정의하고 있다.

정보범주 분류체계에는 4가지 레벨의 필수범주와 사용자가 추가할 수 있는 선택범주로 이루어져 있다. 하위 필수레벨에는 12개의 우선순위가 지정되어 있어 동일 시간에 2가지 이상의 범주가 상충하는 경우에 사용할 수 있다. 순위에 따라 우선하는 범주로 결정된다. 즉, 동시에 2가지 이상의 정보범주가 존재할 수 없다.

정보범주 분류를 위해서는 풍력터빈의 각 상태에 대한 주기에 대하여 레벨 1에서 레벨 4로 정의된 필수정보 범주 중 하나를 지정해야 한다.

레벨 5에 정의된 선택 정보범주들은 설명을 위하여 기술하였으며 적용하지 않을 수도 있다. 이 범주는 사용자의 요구사항에 따라 추가하거나 삭제할 수 있고 추가한 선택 정보범주나 레벨의 수에 제한을 두지 않는다. 하지만 모든 선택 정보범주는 레벨 5 이상에 위치하여야 한다.

본 연구에서는 필수레벨의 정보범주 중 12개의 하위 범주만을 다룬다. 정보범주의 구성과 정의에 대하여 IEC TS 61400-21의 내용에 근거하여 12개의 하위 필수범주들을 다음에 설명한다.

1) 최대성능 발전

최대성능 발전 범주는 풍력터빈이 발전하는 데 아무런 제약을 받지 않는 상태에 있는 것을 말한다. 이 범주는 레벨 4에 해당하며 구성과 정의는 Table 2와 같다.

Table 2 FULL PERFORMANCE category

범주(영문)	최대성능 범주(FULL PERFORMANCE category)
약어	IAOGFP
범주 구성	가용정보(IA) > 운전(O) > 발전(G) > 최대 성능 발전(FP)
필수 우선순위	1
정의	풍력터빈이 발전에 영향을 미치는 기술적 제약이나 한계가 없는 상태에서 설계사양에 따라 운전 및 발전 중
시작 시점	풍력터빈이 최대 성능 상태에서 발전을 시작
종료 시점	풍력터빈이 최대 성능 상태에서 발전을 중단

2) 부분성능 발전

부분성능 범주는 풍력터빈이 기술적인 제약이나 기타의 한계가 있는 상태에서 발전을 하는 경우로 최대성능으로 발전하지 못하는 상태를 말하며 구성 및 정의는 Table 3와 같다. 이 범주에는 출력제한이 포함되지만 이 외의 상태에서 부분성능으로 발전하는 경우에는 이 범주의 하위 범주가 될 수 있다. IEC TS 61400-26-1에서는 이 범주의 하위범주로 정격출력감소와 성능감소를 정의하고 있다.

정격출력 감소는 풍력터빈이 외부 명령이나 외부 제약¹⁾으로 인해 감소된 출력에서 운전 및 발전 중인 경우를 말한다. 성능감소는 풍력터빈이 내부 제약²⁾으로 인해 감소된 출력에서 운전 및 발전 중인 상태를 말한다.

Table 3 PARTIAL PERFORMANCE category

범주(영문)	부분성능 범주(PARTIAL PERFORMANCE category)
약어	IAOGPP
범주 구성	가용정보(IA) > 운전(O) > 발전(G) > 부분 성능 발전(PP)
필수 우선순위	2
정의	풍력터빈이 발전에 영향을 미치는 기술적 제약이나 기타 한계가 있는 상태에서 운전 및 발전
시작 시점	풍력터빈이 부분 성능 상태에서 발전을 시작 특정 활성 혹은 비활성 출력 수준에서 풍력터빈의 운전을 금지하는 외부 혹은 내부조건이 존재
종료 시점	풍력터빈이 부분 성능 상태에서 발전을 중단한다. 특정 활성 혹은 비활성 출력 수준에 풍력터빈의 운전을 금지하는 모든 외부 혹은 내부조건이 종료
선택 범주	정격출력감소 성능감소

1) 외부 제약에는 일반적으로 출력 제한, 발전계통 안전성 지원 모드, 보조 서비스, 환경 조건(온도, 분진, 난류 등) 혹은 기타 외력(소음, 그림자, 플리커, 후류, 난류 등)이 포함된다.

2) 내부 제약에는 부품 과열, 진동수준, 베어링 고장, 컨버터 냉각 시스템 고장 등 부품 손상이나 부품 손상 방지 필요성으로 인하여 나타날 수 있다.

3) 기술적 대기

기술적 대기 범주에 대한 구성 및 정의는 Table 4와 같다. 이 범주에는 다음과 같은 요소들이 포함된다.

- 안전루프시험
- 부품 및 시스템 자체 시험
- 케이블 풀림(Unwinding/Untwisting)
- 온도에 대한 가동조건을 벗어났다가 회복된 시간 이후 가열이나 냉각
- 결빙에 따른 가동조건을 벗어났다가 회복된 시간 이후 해빙
- 명령에서 명령완료까지의 상승시간(Ramp/Uptime)
- 높은 습도에서 풍력터빈이 정지 또는 일시 정지한 이후의 건조시간

Table 4 TECHNICAL STANDBY category

범주(영문)	기술적 대기 범주(TECHNICAL STANDBY category)
약어	IAONGTS
범주 구성	가용정보(IA) > 운전(O) > 비발전(NG) > 기술적 대기(TS)
필수 우선순위	3
정의	풍력터빈이 발전에 필요한 임무를 적극적으로 수행하는 주기
시작 시점	풍력터빈이 기술적 운전대기 임무를 실행하고 추후 하나 이상의 기술적 운전대기 임무를 실행하라는 명령을 결정하거나 수령
종료 시점	풍력터빈이 모든 활성화된 기술적 운전대기 임무를 완료

4) 환경사양 외

환경사양 외 범주의 구성 및 정의는 Table 5와 같고 주위온도, 풍속, 습도, 대기 산성도, 분진, 난류, 공기 밀도 등 자연환경 상태가 설계된 가동조건 범위에서 벗어난 경우로서 발전이 불가능한 상태를 말한다.

Table 5 OUT OF ENVIRONMENTAL SPECIFICATION category

범주(영문)	환경사양 외 범주 (OUT OF ENVIRONMENTAL SPECIFICATION category)
약어	IAONGEN
범주 구성	가용정보(IA) > 운전(O) > 비발전(NG) > 환경사양 외(EN)
필수 우선순위	4
정의	풍력터빈이 운전 가능하나 자연환경 조건이 설계 사양 외에 존재 함으로써 발전이 불가능한 경우
시작 시점	하나 이상의 자연환경조건이 풍력터빈 설계사양 외에서 변경되어 풍력터빈의 발전을 방해
종료 시점	모든 자연환경 조건이 풍력터빈 설계 사양 내에서 변화
선택 범주	시동풍속 이하 ³⁾ , 기타 환경사양

5) 운전정지

운전정지 범주의 정의 및 구성은 Table 6과 같다.

운전정지 범주는 외부의 요구로 인한 정지를 말하며 아래의 요소들이 포함된다.

- 안전관련 이벤트(블레이드의 결빙 등)
- 수동정지
- 교육
- 시찰/실증
- 조류/박쥐보호
- 섹터관리
- 뇌우
- 전체(Full curtailment) 출력제한
- 방해요인 –소음
- 운전자가 요청한 개선 혹은 개선사항

3) 원문은 ‘Carm winds’이나 풍력터빈의 가동 관점에서 ‘시동풍속 이하’로 표시하였다.

Table 6 REQUESTED SHUTDOWN category

범주(영문)	운전정지 범주(REQUESTED SHUTDOWN category)
약어	IAONGRS
범주 구성	가용정보(IA) > 운전(O) > 비발전(NG) > 운전정지(RS)
필수 우선순위	5
정의	풍력터빈이 운전가능하나 국지적 혹은 원격에 의한 외부요구로 인해 정지되어 발전되지 않는 경우
시작 시점	외부 요구에 의해 풍력터빈에 운전정지
종료 시점	모든 활성화된 외부 운전정지 요청이 종료

6) 전기사양 외

전기사양 외 범주의 정의 및 구성은 Table 7과 같다.

이 범주는 전압, 주파수, 상 불평형 등 풍력발전기 외부의 전기적 조건이 풍력터빈이 가동할 수 있는 설계조건을 벗어난 경우를 말한다.

Table 7 OUT OF ELECTRICAL SPECIFICATION category

범주(영문)	전기사양 외 범주 (OUT OF ELECTRICAL SPECIFICATION category)
약어	IAONGEL
범주 구성	가용정보(IA) > 운전(O) > 비발전(NG) > 전기사양 외(EL)
필수 우선순위	6
정의	풍력터빈이 운전 가능하나 풍력터빈 터미널의 전기조건이 설계사양 외에 해당되기 때문에 발전이 불가능한 경우
시작 시점	풍력터빈 터미널에서 하나이상의 전기조건이 설계범주 외에 해당되어 풍력터빈의 발전을 방해
종료 시점	풍력터빈 터미널 상의 모든 전기 조건이 설계사양 내에서 변경

7) 계획정비

계획정비 범주의 정의 및 구성은 Table 8과 같고 계획정비 기간 내 정지가 시작된 모든 상황을 포함한다.

Table 8 SCHEDULED MAINTENANCE category

범주(영문)	계획정비 범주(SCHEDULED MAINTENANCE category)
약어	IANOSM
범주 구성	가용정보(IA) > 비운전(NO) > 계획정비(SM)
필수 우선순위	7
정의	풍력터빈 제조사의 정비설명서에 따라 정기적으로 정비활동을 하는 기간
시작 시점	풍력터빈이 계획정비 수행 의사에 따라 운전이 중지되거나 금지 됨
종료 시점	풍력터빈은 계획정비가 중단되거나 완료되었음을 확인하는 수동적 개입에 의해 이 범주를 종료

8) 계획수정 조치

계획수정 조치 범주는 Table 9와 같다. 계획수정 조치에는 정비, 검사, 조사 등을 통한 개조 및 개선 또는 기타 시정조치가 포함될 수 있다. 또한, 고장이 발생하기 전 조치가 완료될 수 있는 충분한 시간이 확보되는 시정조치를 말한다.

Table 9 PLANNED CORRECTIVE ACTION category

범주(영문)	계획수정 조치 범주 (PLANNED CORRECTIVE ACTION category)
약어	IANOPCA
범주 구성	가용정보(IA) > 비운전(NO) > 계획수정 조치(PCA)
필수 우선순위	8
정의	풍력터빈의 발전 기능을 유지, 복구 또는 개선하는 활동이 일반적인 계획정비의 일부가 아닌 경우, 해당 활동을 위해 요구되는 작업동안 나타남
시작 시점	풍력터빈이 계획수정조치를 수행할 의사에 따라 운전이 중지되거나 금지 됨
종료 시점	풍력터빈은 계획수정조치가 중단되거나 완료되었음을 확인하는 수동적 개입에 의해 이 범주를 종료
선택 범주	개조, 개선, 기타 수정작업

9) 강제정지

강제정지 범주의 정의 및 구성은 Table 10과 같다.

강제정지는 풍력발전기의 손상, 결함 또는 고장이나 경보로 인하여 발전이 불가능한 상태를 말한다.

Table 10 FORCED OUTAGE category

범주(영문)	강제정지 범주(FORCED OUTAGE category)
약어	IANOFO
범주 구성	가용정보(IA) > 비운전(NO) > 강제정지(FO)
필수 우선순위	9
정의	예상치 못한 손상, 결함, 고장 혹은 경보가 감지되어 풍력터빈의 발전기능을 정지해야 하는 즉각적인 조치가 요구되는 경우에 나타나는 수동 혹은 자동으로 감지 할 수 있다.
시작 시점	풍력터빈이 손상, 결함 혹은 고장이나 경보로 인해 발전이 불가능
종료 시점	정지 원인이 종료된 경우
선택 범주	응답, 진단, 물류, 고장수리

10) 중지⁴⁾

중지 범주의 정의 및 구성은 Table 11과 같다.

이 범주에는 아래와 같은 요소가 포함된다.

- 높은 파도, 빙결, 눈, 폭우 등으로 인한 접근제한
- 낙뢰, 토네이도, 우박 등의 악천후 조건
- 삼림지 화재 등으로 인해 시작된 위험의 감소
- 개인안전을 위한 공공당국의 작업 중지 명령
- 현장 작업조건에 적합하지 않은 경우

4) KS C IEC TS 61400-26-1에서는 '정지'로 표현하고 있으나 의미상으로 작업이 외부조건에 의해서 중단됨을 의미하고, 운전정지, 강제정지와와의 혼동을 줄이기 위해서 '중지로 표현하였다.

Table 11 SUSPENDED category

범주(영문)	중지 범주(SUSPENDED category)
약어	IANOS
범주 구성	가용정보(IA) > 비운전(NO) > 중지(S)
필수 우선순위	10
정의	개인안전이나 장비 건전성을 위협하는 조건으로 인해 계획정비, 계획수정조치 및 강제정지범주의 활동이 방해되거나 시작될 수 없는 모든 상황을 포괄
시작 시점	정의된 조건에 따라 작업이 중단된 경우 수동적 개입에 의해 시작
종료 시점	작업정지 조건이 종료된 경우 수동적 개입에 의해 종료
선택 범주	계획정비, 계획수정 조치, 강제정지

11) 불가항력

불가항력 범주는 Table 12와 같다.

이 범주는 당사자들의 통제 범위를 벗어난 상황 또는 특수한 사건이 발생하는 경우에 해당된다. 이러한 상황에서 불가항력 범주는 계약상 관련된 부분이 책임이나 의무로부터 본질적으로 면책된다는 일반적 조항이다.

비가동의 원인이 일반적이고 자연적인 외력(external forces)의 결과이거나 개입의 상황을 명백하게 알 수 있는 경우라면 불가항력이 그 부주의 또는 불법행위에 대한 면책으로 작용하지 않는다.

Table 12 FORCE MAJEURE category

범주(영문)	불가항력 범주(FORCE MAJEURE category)
약어	IAFM
범주 구성	가용정보(IA) > 불가항력(FM)
필수 우선순위	11
정의	불가항력 범주는 관련 당사자들의 통제범위를 벗어난 예외적 인사건 또는 상황으로 인해 해당 당사자들이 자신의 의무를 이행하지 못하는 모든 상황을 포괄
시작 시점	계약내용에 따라 불가항력 상황이 감지되는 경우 수동적 개입에 의해 이 범주가 시작
종료 시점	계약내용에 따라 불가항력 상황이 종료되는 경우 수동적 개입에 의해 이 범주가 종료

12) 비가용 정보

비가용 정보의 정의 및 구성은 Table 13과 같다.

Table 13 INFORMATION UNAVAILABLE category

범주(영문)	비가용 정보 범주 (INFORMATION UNAVAILABLE category)
약어	IU
범주 구성	비가용 정보(IU)
필수 우선순위	12
정의	가용정보 범주가 적용되지 않는 모든 시간을 포괄한다.
시작 시점	풍력터빈이 풍력터빈 운전데이터를 탐지 할 수 없거나 혹은 영구적인 로컬저장 매체로 로깅하거나 다른 저장매체로 데이터를 전송할 수 없게 됨
종료 시점	풍력터빈이 풍력터빈 운전데이터를 탐지 할 수 있고 영구적인 로컬 저장매체로 로깅하거나 다른 저장매체로 데이터를 전송할 수 있게 됨

2. 가동률 계산 공식

가동률을 계산할 때는 아래 공식을 적용한다.

$$\text{가동률} = 1 - \frac{\text{가동 시간}}{\text{가동시간} + \text{비가동 시간}}$$

여기서, 가동 시간 + 비가동 시간은 총 시간이다. 가동률 산출식에 적용하는 요소들은 다음과 같이 3가지 형식으로 이루어진다.

- 가동시간으로 고려하는 정보범주
- 비가동시간으로 고려하는 정보범주
- 가동률 계산에서 배제되는 정보범주

각 가동률은 각 정보범주가 이 중에 어떤 형식에 포함되는 지에 따라 결정된다.

1) 운전가동률

운전가동률은 풍력터빈이 실제로 발전되는 시간의 비율이다.

운전가동률에는 필수레벨에 기초하는 운전가동률(이하, A운전가동률) 알고리즘, 선택레벨을 포함하는 운전가동률(이하, B운전가동률) 알고리즘, 선택레벨을 포함하는 풍력터빈운전가동률(이하, C운전가동률) 알고리즘의 3가지의 가동률 산출 알고리즘이 있다.

(1) 필수레벨에 기초하는 운전가동률 알고리즘(A운전가동률)

12개 범주의 필수레벨에만 기초하는 운전 가동률(A운전가동률) 산출에 적용하는 식은 Table 14와 같다. 최대성능 발전과 부분성능 발전 범주만 가동시간으로 적용하고 나머지는 비가용 정보범주를 제외하고는 비가동 시간으로 적용한다.

Table 14 Operational availability based on mandatory levels only

가동 시간	<ul style="list-style-type: none"> · 발전>최대성능 발전(a) · 발전>부분성능 발전(b)
비가동 시간	<ul style="list-style-type: none"> · 기술적 대기(c) · 환경사양 외(d)⁵⁾ [시동풍속 이하(d1)+ 기타 환경사양 외(d2)] · 운전정지(e) · 전기사양 외(f) · 계획정비(g) · 계획수정 조치(h) · 강제정지(i) · 중지(j) · 불가항력(k)
계산 배제	<ul style="list-style-type: none"> · 비가용 정보(l)
가동률 식	$\text{시스템 운전가동률} = 1 - \frac{c+d+e+f+g+h+i+j+k}{(a+b)+(c+d+e+f+g+h+i+j+k)}$

5) 환경사양 외 범주는 하위 선택범주로서 시동풍속 이하 범주와 기타 환경사양 외 범주로 분류하며, 이 범주들은 B운전가동률과 C운전가동률 산출 시에 사용한다.

(2) 운전가동률 알고리즘/선택레벨 포함(B운전가동률)

환경사양 외 범주의 하위범주로서 시동풍속 이하 범주와 기타 환경사양 외 범주의 선택레벨을 포함하는 운전가동률(B운전가동률)의 산출식은 Table 15와 같다. A운전가동률의 경우에는 시동풍속 이하의 풍속에서도 풍력터빈은 비가동 시간으로 적용하게 된다. 이는 시동풍속 이하의 경우는 풍력터빈이 정상적으로 가동하고 있더라도 발전할 수 있는 환경범위에 도달하지 않은 것이기 때문에 풍력터빈의 입장에서는 과도하게 비가동 시간을 적용한다고 할 수 있다. 하지만 B운전가동률은 환경사양 외 범주를 시동풍속 외 범주와 기타 환경사양 외 범주로 구분함으로써 풍력터빈의 시동풍속 이하 범주는 가동 시간에 포함하고, 기타 환경사양 외 범주는 비가동 시간에 포함한다. 따라서 저풍속의 경우라도 가동률에 불리하게 작용하지 않는다.

Table 15 Operational availability algorithm-including optional levels

가동 시간	<ul style="list-style-type: none"> · 발전>최대성능 발전(a) · 발전>부분성능 발전(b) · 환경사양 외>시동풍속 이하(d1)
비가동 시간	<ul style="list-style-type: none"> · 기술적 대기(c) · 환경사양 외>기타 환경사양 외(d2) · 운전정지(e) · 전기사양 외(f) · 계획정비(g) · 계획수정 조치(h) · 강제정지(i) · 중지(j) · 불가항력(k)
계산 배제	<ul style="list-style-type: none"> · 비가용 정보(l)
가동률 식	<p>시스템 운전 가동률(선택)</p> $= 1 - \frac{c+d2+e+f+g+h+i+j+k}{(a+b+d1)+(c+d2+e+f+g+h+i+j+k)}$

(3) 풍력터빈운전가동률 알고리즘/선택레벨 포함(C운전가동률)

선택레벨을 포함하는 풍력터빈운전가동률(C운전가동률) 산출식은 Table 16과 같다. C운전가동률은 일반적으로 풍력터빈의 제어를 벗어난 경우를 고려한 범주로서 운전가동률과 구분된다. 운영자가 요구하는 운전정지, 계통과의 연결이 불량한 전기사양 외, 그리고 불가항력 범주는 비가용 정보 범주와 함께 가동률 산출 시 계산에서 배제 된다.

Table 16 Turbine operational availability algorithm—including optional levels

가동 시간	<ul style="list-style-type: none"> · 발전>최대성능 발전(a) · 발전>부분성능 발전(b) · 환경사양 외>시동풍속 이하(d1)
비가동 시간	<ul style="list-style-type: none"> · 기술적 대기(c) · 환경사양 외>기타 환경사양 외(d2) · 계획정비(g) · 계획수정 조치(h) · 강제정지(i) · 중지(j)
계산 배제	<ul style="list-style-type: none"> · 운전정지(e) · 전기사양 외(f) · 불가항력(k) · 비가용 정보(l)
가동률 식	<p>풍력터빈 운전 가동률(선택)</p> $= 1 - \frac{c + d2 + g + h + i + j}{(a + b + d1) + (c + d2 + g + h + i + j)}$

2) 기술가동률

기술가동률은 풍력터빈이 설계 사양에 따라 운영되는 주어진 주기의 시간비율이다.

(1) 기술가동률/필수 상태에만 해당

기술가동률을 산출하기 위한 각 요소 및 산출식은 Tabel 18과 같다. 계획수정 조치와 강제정지 범주만 비가동 시간으로 적용한다. 계획정비와 중지, 불가항력 범주는 비가용 정보 범주와 함께 가동률 산출에 배제된다.

Table 18 Technical availability algorithm

가동 시간	<ul style="list-style-type: none"> · 발전>최대성능 발전(a) · 발전>부분성능 발전(b) · 기술적 대기(c) · 환경사양 외(d) · 운전정지(e) · 전기사양 외(f)
비가동 시간	<ul style="list-style-type: none"> · 계획수정 조치(h) · 강제정지(i)
계산 배제	<ul style="list-style-type: none"> · 계획정비(g) · 중지(j) · 불가항력(k) · 비가용 정보(l)
가동률 식	$\text{풍력발전기 기술 가동률} = 1 - \frac{(h+i)}{(a+b+c+d+e+f)+(h+i)}$

III. 풍력발전 SCADA시스템 데이터 분석

1. 연구대상 풍력터빈

1) 가시리 국산화 풍력발전단지 개요

가시리 국산화 풍력발전단지는 제주특별자치도 서귀포시 표선면 가시리 공동목장 내에 위치하고 있으며, 2009년 제주특별자치도청에서 국내 최초 부지선정 공모를 통해 사업에 착수하였고 2012년부터 상업운전 중이다.[14] 단지 내에는 A사 750kW 3기, B사 750kW 3기, C사 1.5MW 3기, 총 13기 풍력터빈으로 15MW의 설치용량을 이루고 있다. Fig. 3은 가시리 국산화 풍력발전단지의 전경이다.



Fig. 3 View of Gasiri Wind Farm

2) 연구대상 풍력터빈

본 연구는 가시리 국산화 풍력발전단지의 5호기와 6호기를 대상으로 한다. Fig. 4는 가시리 국산화 풍력발전단지 내 5호기와 6호기의 위치이다.

본 연구의 대상기간은 2014년 1월 1일부터 12월 31일까지 1년 간이다.



Fig. 4 Location of turbine No. 5 and No. 6

Table 18은 5호기와 6호기에 대한 주요 제원이다. 동일한 용량, 등급, 허브높이, 로터직경을 가지며 시동풍속은 5호기가 3m/s이고 6호기는 4m/s이다. 본 연구에서 이용한 SCADA시스템은 모두 제조사에서 개발하였다.

Table 18 Specifications of turbine No. 5 & No. 6

	5호기	6호기
제조사	A사	B사
SCADA시스템	자체제작	자체제작
허브높이	50m	50m
용량	750kW	750kW
풍력터빈 등급	1A	1A
시동풍속	3m/s	4m/s
정지풍속	25m/s	25m/s
로터직경	50m	50m
제너레이터 형식	PMSG	DFIG

2. SCADA시스템

SCADA(Supervisory Control and Data Acquisition)는 집중 원격감시 제어시스템 또는 감시 제어 데이터 수집시스템이라고 하며 일반적으로 산업 제어시스템을 바탕으로 한 작업공정을 감시하고 제어하는 컴퓨터시스템을 말한다.[15]

SCADA시스템은 풍력발전단지 운영에 있어서 필수적인 요소이다.[16] 풍력터빈 감시를 위한 SCADA시스템은 각 풍력터빈 별로 내부 부품들의 상태 감시 데이터와 주위 환경정보들을 측정하고 수집하여 실시간 모니터링하는 기능을 가지고 있다. 수집된 데이터들은 데이터베이스화하여 저장하고 저장된 데이터들은 가공되어 통계 정보, 이력 조회, 예측 등과 같은 형태로 사용자에게 제공된다.[17] 이는 시스템의 이상 발생에 대한 조기진단 및 고장 예측을 수행하는 상태감시시스템(Condition Monitoring System)과는 구별된다.[18] Fig. 5는 일반적인 SCADA 시스템에 대한 구성도를 보여주고 있다.

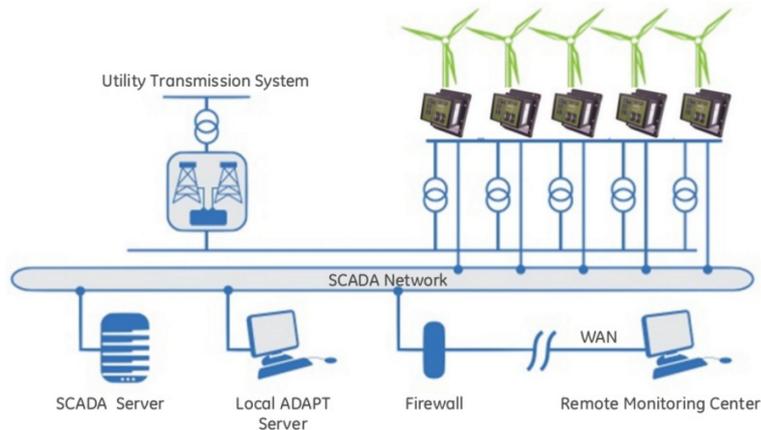


Fig. 5 SCADA System configuration[19]

SCADA시스템은 풍력터빈 운전상태와 발생된 에러에 대한 기록을 발생시간과 함께 저장한다. 이 에러로그 기록은 IEC TS 61400-26-1에 따라 가동률을 산출하기 위한 시간할당에 적합한 기초자료로 사용이 가능하다. 본 연구에서는 이 풍력발전 SCADA시스템의 에러로그 데이터를 이용하여 가동률을 산출하였다.

3. SCADA시스템 데이터 분석

1) 에러로그 기록

Table 19와 Table 20은 5호기와 6호기 SCADA시스템 에러로그의 예를 보여준다.

Table 19는 2014년 8월 2일에 기록된 5호기 SCADA시스템 에러로그 기록의 일부이다. 이 때 제12호 태풍인 나크리의 영향으로 강풍이 불었고 순간 풍속의 상승으로 1 sec wind speed high 에러가 지속적으로 발생하였다. 시스템 보호를 위하여 7시 31분경에 원격으로 풍력터빈을 정지한 것을 확인할 수 있다. 실제로 이 날 7시경에 풍력터빈에서 측정된 최대풍속은 40.3m/s이다.

Table 19 Sample of error logs at turbine No.5

Date/Time	Error Description
2014-08-02 06:42:10	Turbine Status[Standby]
2014-08-02 06:42:10	Turbine Control[RESET]
2014-08-02 06:44:06	1sec wind speed high
2014-08-02 06:44:06	Turbine Status[ERROR]
2014-08-02 06:44:16	Turbine Status[Standby]
2014-08-02 06:44:16	Turbine Control[RESET]
2014-08-02 06:44:36	1sec wind speed high
2014-08-02 06:44:36	Turbine Status[ERROR]
2014-08-02 06:44:46	Turbine Status[Standby]
2014-08-02 06:44:46	Turbine Control[RESET]
2014-08-02 06:46:22	1sec wind speed high
2014-08-02 06:46:22	Turbine Status[ERROR]
2014-08-02 06:46:34	Turbine Status[Standby]
2014-08-02 06:46:34	Turbine Control[RESET]
2014-08-02 07:31:24	Turbine Control[REMOTE STOP]
2014-08-02 13:49:38	Turbine Status[Standby]
2014-08-02 13:50:46	Turbine Status[Startup]
2014-08-02 13:51:14	Turbine Status[Operating]

Table 20은 6호기의 2014년 8월 5일 에러로그이다. 풍속이 풍력터빈의 설계풍속보다 낮은 경우에 발생하는 Generator Under Power 에러가 2회 발생하였다. 이날의 평균풍속은 1.4m/s로서 발전량은 없었다.

Table 20 Sample of error logs at turbine No.6

Time	Alarm Data
2014/08/05_11:09:31	Startup
2014/08/05_11:09:31	Startup Recovered
2014/08/05_11:12:21	GeneratorUnderPower
2014/08/05_11:12:21	GeneratorUnderPower Recovered
2014/08/05_11:12:21	NormalShutdown
2014/08/05_11:12:21	InhibitStart
2014/08/05_11:14:00	NormalShutdown Recovered
2014/08/05_11:14:10	InhibitStart Recovered
2014/08/05_11:50:39	Startup
2014/08/05_11:50:39	Startup Recovered
2014/08/05_11:51:44	GeneratorUnderPower
2014/08/05_11:51:44	GeneratorUnderPower Recovered
2014/08/05_11:51:44	NormalShutdown
2014/08/05_11:51:44	InhibitStart
2014/08/05_11:53:23	NormalShutdown Recovered
2014/08/05_11:53:33	InhibitStart Recovered
2014/08/05_23:58:44	Startup
2014/08/05_23:58:44	Startup Recovered

2) 에러로그 기록에 대한 정보범주 분류

SCADA시스템의 에러로그 기록을 각 항목별로 IEC TS 61400-26-1에 따라 12개의 필수 정보범주로 분류하여 시간을 할당하였다. 각 필수 정보범주별 분류는 '2.1 정보범주 분류체계'에 따라 에러로그의 항목별로 대응하는 정보범주로 분류하였다.

(1) 5호기

가동률 산출을 위한 정보범주 설정과 시간할당을 위해서 1차로 각각의 에러로그 항목별로 대응하는 정보범주로 분류하고, 다음으로 풍력발전단지 운영일지의 기록을 참고하여 풍력터빈에 대한 조치와 주변 환경에 대한 정보범주로 재분류하여 시간을 할당하였다.

Table 21은 5호기에서의 각 정보 범주별로 대응하는 SCADA 에러로그 항목과 풍력터빈에 대한 조치내용 및 환경조건으로 분류한 것이다.

Table 21 Information categories at turbine No.5

정보범주	1차 분류 (에러로그 항목별 분류)	2차 분류 (조치 및 환경에 따른 분류)
최대성능 발전	Operating	
기술적 대기	Standby, Start up, Idle, Reset	
환경사양 외	Low wind speed, Wind speed high	
운전정지	-	요구에 의한 정지
전기사양 외	Grid Interruption	
계획정비	-	정기점검
계획수정조치	-	계획된 수정조치
강제정지	Error, Stopped, Service Mode	
비가용정보	SCADA Scheduler Status[Stop]	

최대성능 발전범주는 풍력터빈이 정상가동하여 발전하는 단계인 ‘Operating’ 단계를 적용하였다. 기술적 대기범주는 대기모드 인 ‘Standby’, 가동을 시작하는 단계인 ‘Start up’, 발전 없이 로터가 회전하는 ‘Idle’, 에러를 벗어나는 ‘Reset’ 상태를 적용하였다. 환경사양 외 범주에는 풍속이 시동풍속보다 낮은 경우에 나타나는 ‘Low wind speed’와 풍속이 제한풍속을 초과할 때 발생하는 ‘Wind speed

high'로 분류하였다.

운전정지 범주는 풍력터빈이 정지한 상황 중에서 풍력터빈 운영일지의 내용을 참고하여 운영자의 요구에 의한 정지인 경우를 적용하였다.

전기사양 외 범주는 전력계통의 정전상태를 알리는 'Grid Interuption'이 발생한 상태를 분류하고 운영일지를 참고하여 계획된 정전인지를 확인하였다. 만약 계획된 정전인 경우에는 전기사양 외 범주보다 상위 순위인 운전정지 범주에 해당한다.

계획정비 범주는 운영일지를 통하여 정기점검이 실시된 기간에 수동정지된 시간을 적용하였다. 계획수정조치는 풍력발전기가 가동이 가능한 상태에서 수동정지하여 점검이나 수리 등을 실시한 경우를 분류하였다.

강제정지는 1차적으로 풍력터빈의 상태가 'Error', 'Stopped', 'Service Mode'인 경우를 분류하였고, 2차적으로 운영일지를 확인하여 상위순위에 해당하지 않는 경우를 적용하였다. 비가용 정보 범주는 'SCADA Scheduler Status[Stop]' 상태인 경우를 적용하였다.

Table 22는 5호기의 2014년 1월 1일부터 12월 31일까지 1년 간의 풍력터빈에 대한 조치사항, 풍력발전단지 환경조건과 그에 대응하는 정보범주이다.

조치 또는 발생 일자, 작업을 하거나 발생한 내용, 소요 시간과 함께 Table 21를 적용하여 정보범주별로 분류하였고, 각 가동률 산출 시에 가동시간으로 적용되면 '○', 비가동 시간으로 적용되면 '×', 산출식 적용에서 배제되면 '-'로 표시하였다.

예를 들면, 2014년 10월 10일의 SCADA시스템 에러로그 기록으로부터 5호기 풍력터빈이 8시간 가량 유지보수 모드(Service Mode)로 정지하였음을 확인하였다. 1차 분류에서는 강제정지 범주로 분류하였지만, 운영일지를 통하여 이 시간 동안에 계획정비가 이루어졌음이 확인되어, 계획정비 범주가 강제정지 범주보다 우선순위에 해당하므로 이 시간동안의 정보범주를 계획정비 범주로 분류하였다. 가동률 산출 시에 계획정비 범주는 운전가동률에서 전부 비가동 시간으로 적용되고 기술가동률 산출 시에는 산출 식에 적용되지 않는다.

Table 22 Event record at turbine No.5

일 자	작업/발생 내용	시간	정보범주	비 고	가동시간 적용여부			
					A 운전	B 운전	C 운전	기술
01/20	풍력터빈 점검	25분	강제정지	고장점검	×	×	×	×
01/24	하자검사	5.3시간	운전정지	요구사항	×	×	-	○
02/16	정전	36분	전기사양 외	외부원인	×	×	-	○
03/27	풍력터빈 점검	51분	운전정지	요구사항	×	×	-	○
04/09	풍력터빈 점검	1.26시간	계획수정 조치	발전가능	×	×	×	×
04/10	정전	9분	전기사양 외	외부원인	×	×	-	○
04/29	풍력터빈 점검	5분	계획수정 조치	발전가능	×	×	×	×
06/02	정전	8분	전기사양 외	외부원인	×	×	-	○
06/11	풍력터빈 점검	1.3시간	계획수정 조치	발전가능	×	×	×	×
07/07	정전	9분	전기사양 외	외부원인	×	×	-	○
07/09	태풍에 따른 정지	5.8시간	운전정지	요구사항	×	×	-	○
08/02	태풍에 따른 정지	6.3시간	운전정지	요구사항	×	×	-	○
08/06	풍력터빈 점검	1시간	계획수정 조치	발전가능	×	×	×	×
08/11	정전	53분	전기사양 외	외부원인	×	×	-	○
10/10	정기점검	5.26시간	계획정비		×	×	×	-
10/11	정전	1시간	전기사양 외	외부원인	×	×	-	○
10/14	정기점검	48분	계획정비		×	×	×	-
10/21	하자검사	36분	운전정지	요구사항	×	×	-	○
10/24	정기점검	7.58시간	계획정비		×	×	×	-
10/28	정기점검	8.55시간	계획정비		×	×	×	-
10/30	정기점검	6.35시간	계획정비		×	×	×	-
12/05	풍력터빈 점검	12분	계획수정 조치	발전가능	×	×	×	×
12/10	SCADA서버 관련 에러	36.3시간	비가용정보		-	-	-	-
합 계(시간)		90시간			0	0	0	22

Table 23은 5호기의 경우, 각 에러로그 항목에 대응하는 정보범주로 분류하고 시간을 할당 한 예이다.

Table 23 Time allocation for each error log event and information category at turbine No.5

일시	에러로그	정보범주	코멘트	시간
~				
2014-10-11 01:08:25	Turbine Status[Operating]	최대성능 발전		1:45:36
2014-10-11 02:54:01	Cooling water temp. from PCS high	강제정지		0:00:00
2014-10-11 02:54:01	Turbine Status[ERROR]	강제정지		4:04:46
2014-10-11 06:58:47	Turbine Status[Startup]	기술적 대기		0:00:00
2014-10-11 06:58:47	Turbine Control[RESET]	기술적 대기		0:00:32
2014-10-11 06:59:19	Turbine Status[Operating]	최대성능 발전		0:07:40
2014-10-11 07:06:59	INV DC Link Over VOLT(S/W)	전기사양외	정전	1:02:14
2014-10-11 07:06:59	INV Grid VOLT Imbalance	전기사양외		
2014-10-11 07:06:59	Turbine Status[ERROR]	전기사양외		
2014-10-11 07:07:01	CONV DC Link Over VOLT	전기사양외		
2014-10-11 08:09:13	Turbine Status[Startup]	기술적 대기		0:00:00
2014-10-11 08:09:13	Turbine Control[RESET]	기술적 대기		0:00:32
2014-10-11 08:09:45	Turbine Status[Operating]	최대성능 발전		1:34:36

2014년 10월 11일 5호기는 1시 8분경부터 1시간 45분까지 정상가동했고 이 시간 동안을 ‘최대성능 발전’ 범주로 분류하였다. 이후 전력변환장치(PCS) 냉각수 온도의 상승에 따른 알람이 발생하고 정지하였으므로 ‘강제정지’ 범주로 분류하였다. 4시간 후 냉각수 온도가 정상범위로 내려오자 풍력터빈은 ‘기술적 대기’ 범주를 거친 후 다시 재가동하여 ‘최대성능 발전’ 범주에 해당하게 되었다. 이후 7분 여 간의 가동 후 정전이 발생하여 약 1시간 동안을 ‘전기사양 외’ 범주로 분류하였다. ‘전기사양 외’ 범주는 SCADA 에러로그 기록과 함께 풍력터빈의 운영 일지를 참고하여 정하였다.

(2) 6호기

Table 24는 6호기에서의 각 정보 범주별로 대응하는 SCADA 에러로그 항목과 풍력터빈에 대한 조치내용 및 환경조건으로 분류한 것이다.

Table 24 Information categories at turbine No.6

정보범주	1차 분류 (에러로그 항목별 분류)	2차 분류 (조치 및 환경에 따른 분류)
최대성능 발전	Start up Recovered	
기술적 대기	Inhibit Start Recovered, Start up, Cable Wind up	
환경사양 외	Generator Under Power Generator Under Speed	
운전정지	-	요구에 의한 정지
전기사양 외	-	정전발생
계획정비	-	정기점검
계획수정조치	-	계획된 수정조치
강제정지	각 에러 발생 시	

최대성능 발전 범주의 경우는 발전을 시작하는 단계인 ‘Start up Recovered’, 기술적 대기 범주는 ‘Inhibit Start Recovered’, ‘Start up’과 케이블 꼬임을 나타내는 ‘Cable Wind Up’을 적용하였다.

환경사양 외 범주는 ‘Generator Under Power’와 ‘Generator Under Speed’를 분류하였고 강제정지 범주는 이 외의 각 에러가 발생하는 경우를 적용하였다.

그리고 2차적으로 풍력터빈의 운영일지의 내용에 따라서 운전정지, 전기사양 외, 계획정비, 계획수정 조치, 강제정지 범주로 분류하였다.

부분성능 발전, 중지, 불가항력, 비가용 정보 범주는 분류된 내용이 없어서 표시하지 않았다.

Table 25는 6호기에 대한 2014년 1월 1일부터 12월 31일까지 1년간의 풍력터빈 조치 내용과 풍력발전단지 환경 조건이다. 1월에 블레이드 관련 점검으로 계획정비가 있었고, 4월에는 계획정비와 계획수정 조치 범주에 해당하는 조치가 있었다.

Table 25 Event record at turbine No.6

일 자	작업/발생 내용	시간	정보범주	가동시간 적용여부			
				A 운전	B 운전	C 운전	기술
1/7	블레이드 점검	4.8시간	계획정비	×	×	×	-
1/23~24	블레이드 점검	31시간	계획정비	×	×	×	-
1/27~28	블레이드 점검	26.6시간	계획정비	×	×	×	-
2/18	PCS자료 취득	23분	계획수정 조치	×	×	×	×
3/24	정전	10.5시간	전기사양 외	×	×	-	○
4/7~9	블레이드 점검	30시간	계획정비	×	×	×	-
4/19	블레이드 점검	1.5시간	계획수정 조치	×	×	×	×
4/22~25	제너레이터 개선	76시간	계획수정 조치	×	×	×	×
6/2	정전	3시간	전기사양 외	×	×	-	○
7/7	정전	40분	전기사양 외	×	×	-	○
7/9	태풍에 따른 정지	25분	운전정지	×	×	-	○
7/21	UPS 교체	22분	계획수정 조치	×	×	×	×
8/2~3	태풍에 따른 정지	23시간	운전정지	×	×	-	○
8/11	정전	1시간	전기사양 외	×	×	-	○
9/26	풍력터빈 점검	1.6시간	계획수정 조치	×	×	×	×
10/11	정전	3분	전기사양 외	×	×	-	○
10/29~31	정기점검	1시간	계획정비	×	×	×	-
11/18~19	정기점검	19시간	계획정비	×	×	×	-
합계(시간)		230시간		0	0	0	39

분류되는 정보범주는 전기사양 외, 운전정지, 계획정비, 계획수정 조치 범주이며, A운전가동률과 B운전가동률의 산출식에서는 모두 비가동 시간으로 적용하고 C운전가동률 산출 시에는 전기사양 외와 운전정지 범주는 계산에서 배제한다. 기술가동률 산출 시에 전기사양 외와 운전정지 범주는 가동시간으로 적용하고, 계획수정 조치는 비가동 시간으로 적용하며 계획정비는 산출식에 적용하지 않는다.

Table 26은 6호기의 에러로그 항목과 발생시간을 이용하여 각 정보범주별로 분류하고 시간을 할당한 예이다.

Table 26 Time allocation for each error log event and information category at turbine No.6

일 시	에러로그	정보범주	코멘트	시 간
~				
2014-05-04 22:22:27	Startup	기술적 대기		0:00:01
2014-05-04 22:22:28	Startup Recovered	최대성능 발전		1:28:45
2014-05-04 23:51:13	Generator Under Power	환경사양 외		0:01:49
2014-05-04 23:51:13	Generator Under Power Recovered			
2014-05-04 23:51:13	NormalShutdown			
2014-05-04 23:51:13	Inhibit Start			
2014-05-04 23:52:52	Normal Shutdown Recovered			
2014-05-04 23:53:02	Inhibit Start Recovered	기술적 대기		0:03:16
2014-05-04 23:56:18	Startup	기술적 대기		0:00:00
2014-05-04 23:56:18	Startup Recovered	최대 성능 발전		0:03:42
2014년 5월 4일			소 계	24:00:00

2014년 5월 4일의 에러로그 기록을 분류한 자료의 일부로서, 22시 22분 경 부터 기술적 대기 범주 1초를 거치고 발전을 시작하여 1시간 28분 동안 최대성능 발전 범주에 해당한다. 그리고 저풍속 상태인 ‘Generator Under Power’ 메시지가 발생하여 환경사양 외 범주로 1분 49초가 할당되었고 3분 16초의 기술적 대기 범주 후 다시 최대성능 발전 범주에 해당하게 된다. 이런 형식으로 하루 24시간을 각 정보범주 별로 중복되는 시간 없이 할당하였다.

여기서 SCADA시스템의 에러로그는 풍력터빈의 상태를 모니터링하고 기록하는 것이기 때문에 이 에러로그 기록만으로 분류하는 것은 환경사양 외 범주에 해당하는 시간이 기술적 대기 범주로 분류될 수 있는 여지를 가지고 있다. 하지만 A 운전가동률 산출 시에는 두 범주 모두 비가동 시간으로 분류하고 기술가동률 산출 시에는 둘 다 가동시간으로 적용하기 때문에 본 연구에서는 에러로그 기록에 따라서 분류하였다.

3) 시간이 할당된 정보범주

Table 27은 5호기의 에러로그 항목에 따라서 각 정보범주별로 할당된 시간이다. 총 8,760시간이고 부분성능 발전, 중지, 불가항력 범주에 할당한 시간은 없었다.

Table. 27 Distributed time to each information category at turbine No.5

월	최대 성능 발전	부분 성능 발전	기술적 대기	환경 사양 외	운전 정지	전기 사양 외	계획 정비	계획 수정 조치	강제 정지	정지	불가항력	비가용 정보	시간 합
1월	626:23	0:00	101:26	0:53	5:12	0:00	0:00	0:00	10:04	0:00	0:00	0:00	744:00
2월	600:00	0:00	66:42	0:42	0:00	0:36	0:00	0:00	3:05	0:00	0:00	0:53	672:00
3월	655:29	0:00	67:46	0:57	0:51	0:00	0:00	0:00	18:06	0:00	0:00	0:47	744:00
4월	553:38	0:00	152:24	1:35	0:00	0:09	0:00	1:21	10:50	0:00	0:00	0:00	720:00
5월	547:06	0:00	183:31	6:53	0:00	0:00	0:00	0:00	6:28	0:00	0:00	0:00	744:00
6월	481:14	0:00	226:23	2:05	0:00	0:08	0:00	1:18	8:49	0:00	0:00	0:00	720:00
7월	481:48	0:00	221:03	3:19	5:50	0:09	0:00	0:00	31:48	0:00	0:00	0:00	744:00
8월	524:47	0:00	155:49	2:44	6:19	0:53	0:00	1:01	52:24	0:00	0:00	0:00	744:00
9월	583:49	0:00	115:29	1:48	0:00	0:00	0:00	0:00	18:53	0:00	0:00	0:00	720:00
10월	550:18	0:00	103:59	1:01	0:36	0:00	28:34	0:00	59:30	0:00	0:00	0:00	744:00
11월	613:29	0:00	104:35	1:17	0:00	0:00	0:00	0:00	0:37	0:00	0:00	0:00	720:00
12월	591:39	0:00	90:51	8:54	0:00	0:00	0:00	0:12	16:01	0:00	0:00	36:20	744:00
합계	6809:46	0:00	1590:02	32:13	18:506	1:57	28:34	3:55	236:39	0:00	0:00	38:01	8760:00

Table 28은 6호기의 정보범주별로 할당된 시간이다. 부분성능 발전, 중지, 불가항력, 비가용 정보에 해당하는 범주에 대한 할당시간은 없었다.

Table 28 Distributed time to each information category of turbine No.6

월	최대 성능 발전	부분 성능 발전	기술적 대기	환경 사양 외	운전 정지	전기 사양 외	계획 정비	계획 수정 조치	강제 정지	정지	불가항력	비가용 정보	시간 합
1월	320:29	0:00	344:15	8:06	0:00	0:00	63:19	0:00	7:48	0:00	0:00	0:00	744:00
2월	514:24	0:00	138:55	6:03	0:00	0:00	0:00	0:23	12:12	0:00	0:00	0:00	672:00
3월	589:52	0:00	122:17	6:54	0:00	10:30	0:00	0:00	14:26	0:00	0:00	0:00	744:00
4월	344:25	0:00	233:05	7:55	0:00	0:00	29:55	77:32	27:05	0:00	0:00	0:00	720:00
5월	401:42	0:00	312:25	26:46	0:00	0:00	0:00	0:00	3:05	0:00	0:00	0:00	744:00
6월	333:29	0:00	365:41	15:42	0:00	2:59	0:00	0:00	2:06	0:00	0:00	0:00	720:00
7월	315:59	0:00	398:20	26:48	0:25	0:40	0:00	0:22	1:23	0:00	0:00	0:00	744:00
8월	407:04	0:00	297:14	13:55	24:19	0:59	0:00	0:00	0:26	0:00	0:00	0:00	744:00
9월	451:21	0:00	248:27	17:53	0:00	0:00	0:00	1:39	0:37	0:00	0:00	0:00	720:00
10월	497:37	0:00	231:14	13:17	0:00	0:03	0:56	0:00	0:51	0:00	0:00	0:00	744:00
11월	452:09	0:00	218:10	13:46	0:00	0:00	26:16	0:00	9:37	0:00	0:00	0:00	720:00
12월	494:42	0:00	207:38	29:37	0:00	0:00	0:00	0:00	12:01	0:00	0:00	0:00	744:00
합계	5123:19	0:00	3117:45	186:48	24:44	15:13	120:27	79:57	91:43	0:00	0:00	0:00	8760:00

(1) 각 정보범주별 할당시간 비교·분석

각 정보범주에 대한 시간할당량은 Fig. 6 ~ Fig. 8과 같다.

5호기의 최대성능 범주 시간은 6,809시간(77.7%)이고, 6호기는 5,123시간(58.5%), 기술적 대기 범주는 5호기가 1,590시간(18.2%)이고 6호기가 3,117시간(35.6%)이다. 이 두 범주가 5호기는 95.9%, 6호기는 94.1%를 차지한다. 발전기 별로 비교하면 최대성능발전 정보범주의 경우는 5호기가 6호기에 비해 1,686시간이 많고, 기술적대기 정보범주는 1,527시간이 적다.

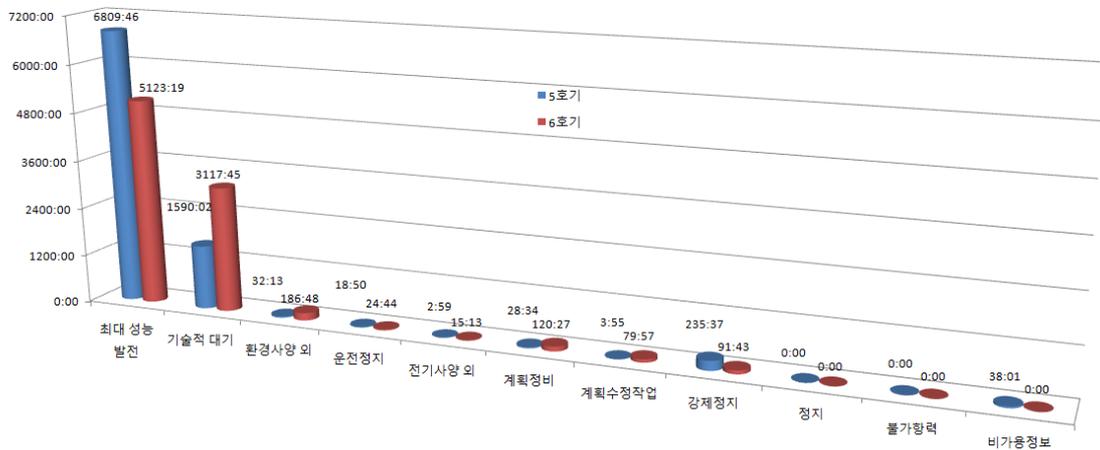


Fig. 6 Time allocation for each information category at turbine No.5 & No.6

환경사양 외 범주는 5호기가 32시간, 6호기가 186시간으로 6호기가 154시간이 더 많다. 환경사양 외 범주는 주로 저풍속⁶⁾일 때 발생한다. 5호기의 시동풍속이 3m/s이고 6호기의 시동풍속이 4m/s인 점을 감안하면 두 풍력발전기의 특성 차이와 함께 시동풍속에 의하여 최대성능 발전 범주의 시간차이가 생긴다는 것을 알 수 있다. 즉 풍속이 3~4m/s인 상황에서 5호기는 최대성능 발전 범주에 존재하게 되지만 6호기의 경우는 저풍속에 의한 환경사양 외 또는 기술적 대기 범주에 있게 된다.

환경적으로 저풍속일 경우에 풍력터빈의 상태가 전부 환경사양 외의 범주에 해당하는 것은 아니고, 저풍속에 대한 메시지가 발생하고 일정시간 이후에는 기술

6) 풍력터빈의 시동풍속이하의 풍속

적 대기상태에 있게 된다. 이것은 Table 20과 Tabel 26으로부터 알 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8로부터 각 정보범주별 할당량을 비교할 수 있다.

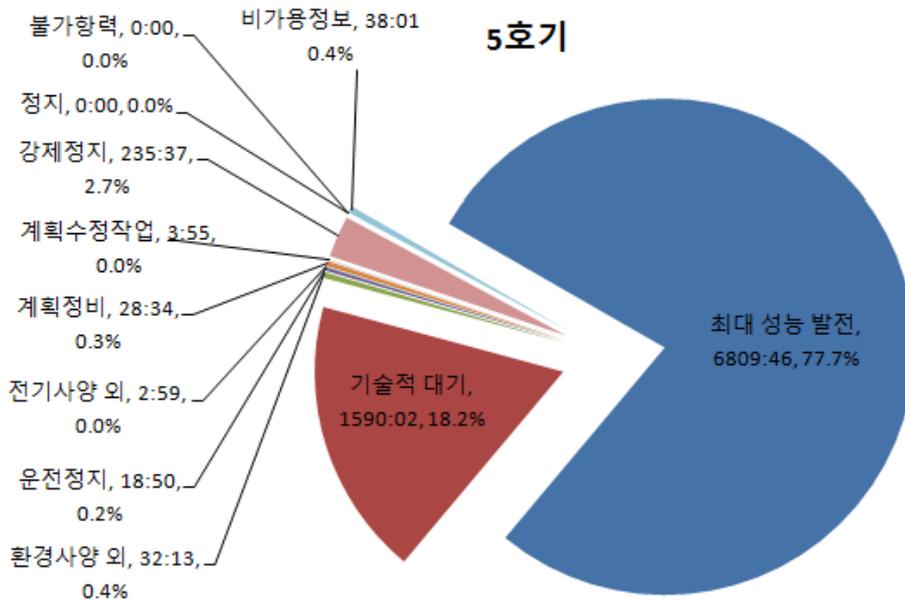


Fig. 7 Ratio of each information category at turbine No.5

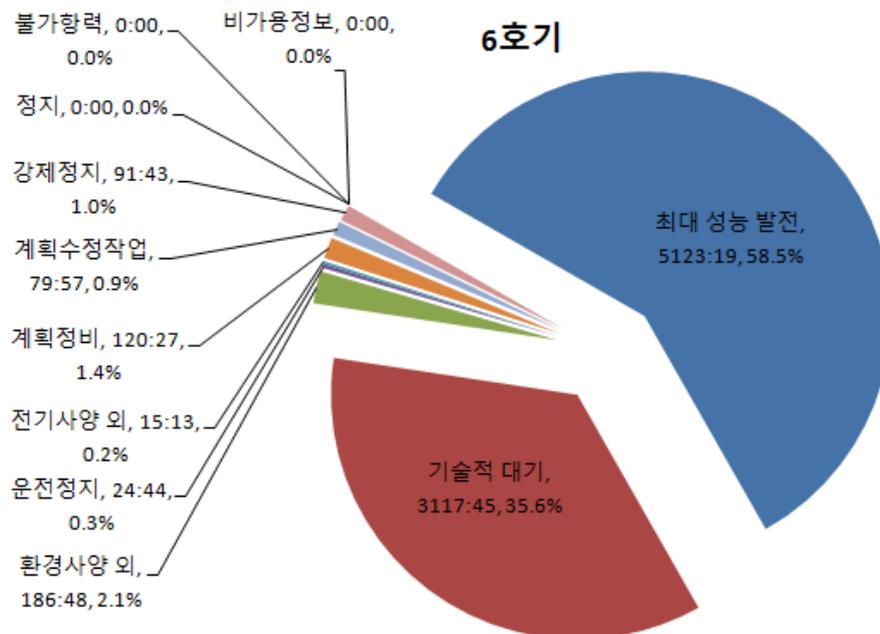


Fig. 8 Ratio of each information category at turbine No.6

5호기는 6호기에 비하여 최대성능 발전 범주의 할당 시간이 많고 6호기는 5호기보다 기술적 대기와 환경사양 외 범주의 할당 시간이 많은 것을 알 수 있다. 운전정지 범주는 하자검사나 태풍에 의한 정지 등과 같은 운영자의 요청에 의해서 정지한 경우로 해당 사항을 운영일지에서 확인 후 재분류하였으며 두 풍력터빈이 비슷한 시간범위를 보이고 있다.

전기사양 외 정보범주는 수변전 설비에서의 차단기 동작 등 예상치 못한 정전 발생과 전압, 전류, 주파수의 변동 등이 해당된다. 5호기와 6호기 간 약 13시간 가량의 차이가 발생하였다. 계획정비 정보범주는 2014년 1월과 4월에 6호기의 블레이드 관련 점검이 이루어졌는데, 제작사가 권고하는 정기적인 정비활동에 해당되어 계획정비 범주로 분류하였고 이로 인해 6호기가 5호기보다 계획정비 시간이 92시간 가량 많다.

계획수정 조치 범주는 6호기에서 4월 22일부터 3일간 제너레이터의 개선작업이 있어서 계획수정 조치 범주로 분류하였고, 76시간가량 6호기의 할당시간이 많아지게 되었다. 강제정지 정보범주는 에러 또는 고장으로 풍력터빈이 가동되지 않을 때를 분류하였고 5호기가 236.6시간, 6호기가 91.7시간으로 5호기가 145시간 가량 많았다.

부분성능 발전, 중지, 불가항력 정보범주는 해당 사항이 없었다.

비가용정보 범주는 5호기에서 2014년 12월에 서버용량 관련 이상으로 36시간 가량 데이터가 저장되지 않는 등 3건의 비가용 정보 범주에 해당하는 이벤트가 있었다.

IV. IEC TS 61400-26-1에 따른 SCADA데이터의 가동률 산출

1. 가동률 정의

가동률은 주로 두 가지 종류로 구분된다. 운전가동률과 기술가동률이다. 운전가동률은 주로 풍력단지 운영자가 풍력발전시스템 전반을 보는 관점에서 얼마나 발전하여 수익을 내는지 측정하는 것을 말한다.[6],[7]

기술가동률은 제조업자가 풍력발전기를 보는 관점에서 풍력터빈이 원래 의도한 운전량에 비하여 얼마나 운전되는지 측정하는 것을 말한다.[6],[7]

풍력발전단지를 신규로 건설하고 공급자와의 계약에 의하여 이루어지는 성능보증시험에는 가동률이 포함된다. 일반적으로 이 가동률에는 정전시간과 불가항력 범주와 같은 비가동 시간을 가동한 것으로 계산된다. 때로는 연간 계획정비와 같은 주기적으로 계획된 정비에 대한 허용⁷⁾을 포함한다. 이 허용은 각기 다르나 연간 60시간, 즉 약 1%의 시간이 일반적이다.

풍력터빈이 유지보수나 정비를 위하여 정지할 때에는 발전을 통한 수입을 발생시키지 못한다. 그렇기 때문에 이러한 정전시간, 불가항력 범주, 주기적 계획정비를 가동한 것으로 적용하여 가동률은 산출하는 것은 풍력단지 운영자 측면에서는 납득하지 못하는 결과를 낳게 될 수도 있다. 따라서 가동률의 정의는 풍력단지의 건설 전 계획 단계에서부터 협의되어야 하고 성능보증 평가와 풍력단지 운영에 적용되어 활용되어야 할 것이다.

IEC TS 61400-26-1에서는 기술가동률과 함께 필수레벨에 기초하는 운전가동률(A운전가동률), 선택레벨을 포함하는 운전가동률(B운전가동률), 선택레벨을 포함하는 풍력터빈 운전가동률(C운전가동률)을 산출할 수 있도록 하고 있다.

이에 따라 앞서 에러로그 데이터를 이용하여 정보범주 별로 할당된 시간을 가지고 각각의 가동률을 산출하였다.

7) 풍력터빈이 계획정비 등으로 실제로는 정지하였지만 가동한 것으로 보는 것

2. 가동률 산출

가동률 산출은 각 풍력터빈 SCADA시스템의 에러로그 기록을 이용하여 이루어졌고, 에러로그 기록은 시간이 흐르는 동안 풍력터빈의 상태와 에러 발생 시간 기록들로 이루어져 있어 가동률 산출에 적합하다.

IEC TS 61400-26-1에 따라 시간을 할당하기 위하여 1차적으로 에러로그 기록을 각각 해당되는 정보 범주에 대응시켜 정보범주별로 시간을 할당하였고 다음 단계로 분석기간 동안 이루어진 풍력발전기 유지보수, 발전단지 정전, 태풍 등에 의한 정지에 해당하는 정보범주로 재분류하였다. 그리고 분류된 정보범주들을 각 가동률의 산출식에 따라 가동시간 또는 비가동시간에 적용하거나 적용 배제하여 A, B, C운전가동률과 기술가동률을 산출하였다.

Table 29는 IEC TS 61400-26-1 부속서 C에 있는 가동률 산출을 위한 표의 내용이다. 이를 이용하여 에러로그의 각 상태 별 시간을 그 상태에 해당하는 정보 범주로 분류하고 시간을 할당한 후 산출식을 적용하여 가동률을 구한다. 녹색은 각 정보범주를 가동률 산출식에 적용할 때 가동한 시간에 포함하는 것이고 적색은 가동하지 않은 시간에 포함하는 것이다. 회색은 산출식에 적용하지 않는다.

Table 29 Time allocation to information categories

	필수 정보 범주												A운전가동률	기술가동률		
	최대성능 발전	부분성능 발전	기술적 대기	환경사양 외	운전정지	전기사양 외	계획정비	계획수정작업	강제정지	정지	불가항력	비가용 정보				
A운전가동률	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	×	
기술가동률	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		×

1) 가동률 산출 결과

가동률 산출결과는 Fig. 9와 같이 5호기의 A운전가동률 78.1%, B운전가동률 78.4%, C운전가동률 78.7%, 기술가동률 97.2% 그리고 6호기의 경우는 A운전가동률 58.5% B운전가동률 60.6%, C운전가동률 61.0%, 기술가동률 98.0%로 산출되었다.

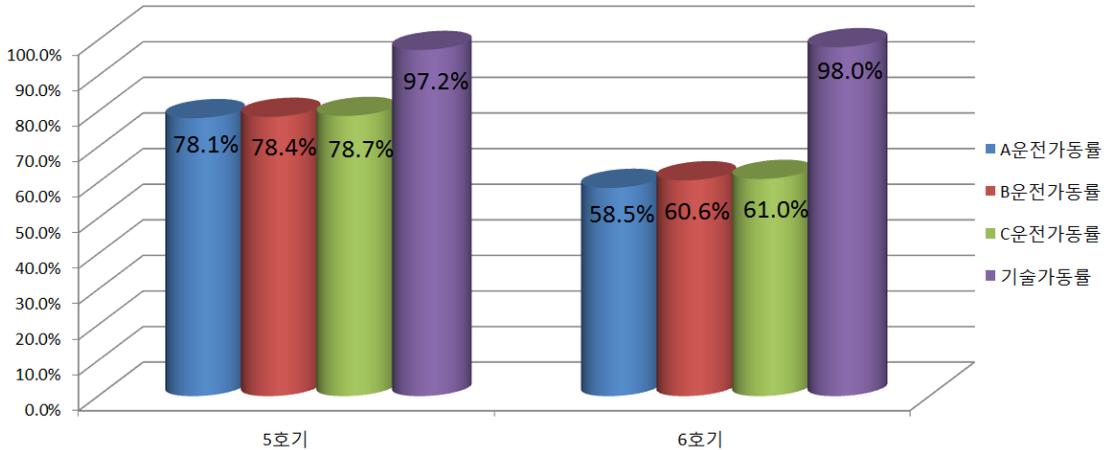


Fig. 9 Each availability at turbines No.5 & No.6

운전가동률과 기술가동률이 차이를 보이는 것은 기술가동률이 계획수정 조치와 강제정지에만 정지한 것으로 적용하는 반면에 운전가동률은 최대성능 발전과 부분성능 발전 시에만 가동한 것으로 적용하여 가동률을 산출하기 때문이다.⁸⁾

5호기와 6호기의 운전가동률은 17~19% 가량의 차이를 보인다. 이는 앞서 말한 바와 같이 운전가동률 산출에 크게 영향을 미치는 것이 최대성능 발전과 부분성능 발전 범주로서, 5호기와 6호기가 최대성능 발전 범주의 할당시간에 크게 차이를 보이기 때문이다.⁹⁾

최대성능발전 정보범주의 할당시간은 5호기가 6,810시간, 6호기는 5,123시간으로 1년 총 시간(8,760시간)의 77.7%와 58.5%에 해당하고, 여기에 비가용 시간을 제외 한 총 시간으로 나누어 준 것이 운전가동률(A운전가동률)이다. 계획정비, 중지, 불가항력 범주, 비가용 정보는 운전가동률 산출 시에는 적용되나 기술가동률 산출 시 계산에는 적용되지 않는다.

8) B와 C운전가동률의 가동시간에는 “시동풍속 이하” 범주도 포함한다.

9) 본 연구의 대상기간에서 부분성능발전 범주에 해당하는 시간은 없었다.

(1) 월별가동률 산출 결과

Fig. 10은 산출된 각 월별 가동률을 그래프로 나타낸 것이다. 평균풍속이 변함에 따라 풍력터빈의 발전 시간인 최대성능 발전 범주 할당시간이 달라지게 되고, 이 영향으로 운전가동률 값이 변화하고 있으며 기술가동률은 풍속에 관계없이 일정한 수준을 보이고 있다.

Fig. 10에서 10월에 5호기의 운전가동률이 변화추이에 비해 작은 것을 알 수 있는데 이는 10월에 계획정비가 있었기 때문이다. 기술가동률이 작아진 것은 계획정비와는 관계없고 강제정지 범주가 약 58.5시간으로 다른 달보다 많았기 때문이다.

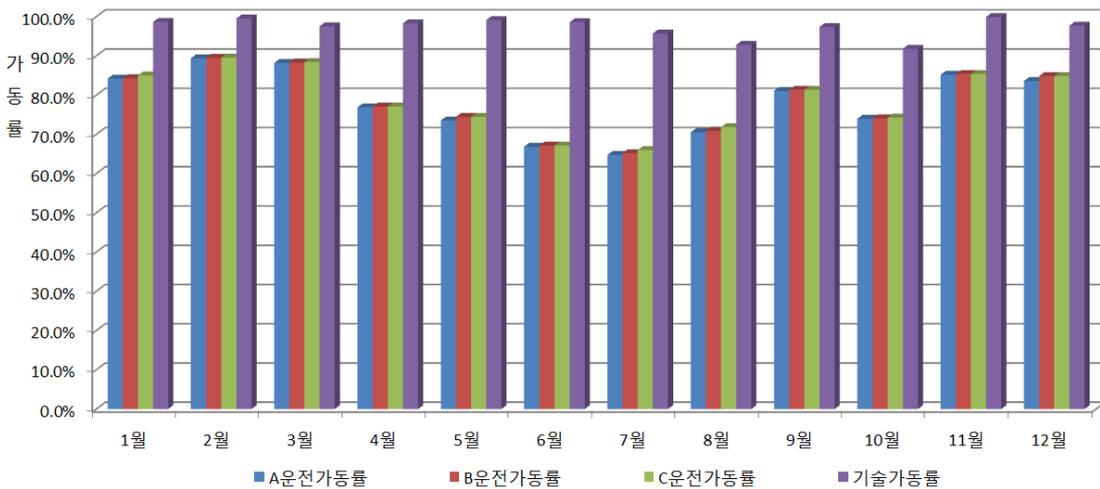


Fig. 10 4 kinds of availability with month at turbine No. 5

Fig. 11은 6호기의 월별로 산출된 가동률 그래프이다. 5호기에 비하여 최대성능 발전 범주의 할당 시간이 20%가량 낮음에 따라서 운전가동률도 전체적으로 비슷한 수준으로 낮게 나타나고 있다. 여기서 주목할 점을 1월의 경우에는 기술가동률은 유지되고 있으나 운전가동률이 낮고, 4월의 경우에는 운전가동률과 기술가동률 모두가 낮아졌다는 점이다. 이는 1월에 있었던 블레이드 점검이 제작사의 권고된 주기에 따라 시행한 것으로 계획정비 범주에 포함하였고, 4월에는 계획정비와 함께 제너레이터 개선작업을 계획수정 조치 범주로 분류하였기 때문이다.

즉, 계획정비는 운전가동률에는 영향을 주지만 기술가동률에는 영향이 없고, 계획수정 조치는 운전가동률과 기술가동률 모두에게 영향을 주었기 때문에 그 값이 낮아졌다.

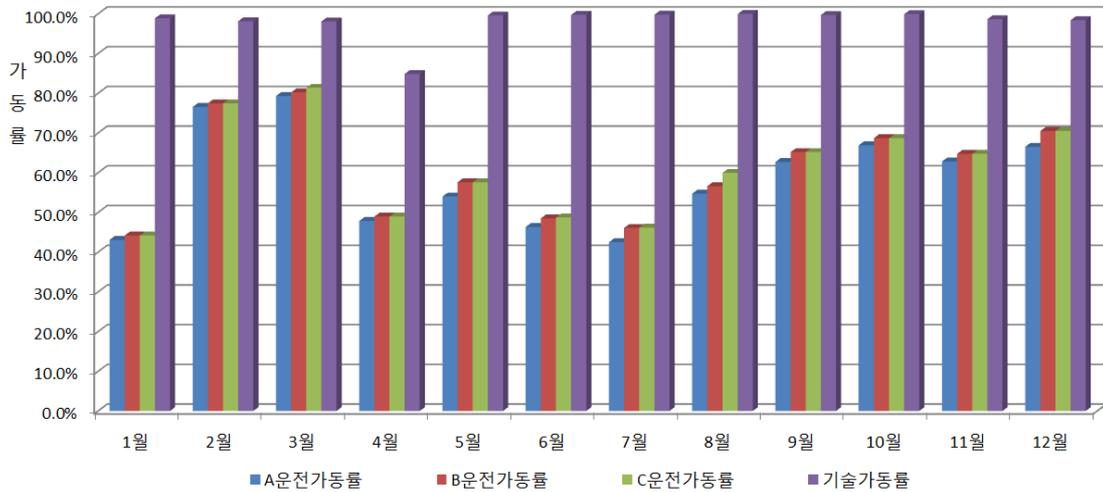


Fig. 11 4 kinds of availability with month at turbine No. 6

V. SCADA시스템과 IEC TS 61400-26-1에 근거한 가동률 비교

1. 산출된 가동률과 SCADAGA동률 비교

SCADA시스템에서 제시하는 가동률은 5호기, 6호기 모두 97%이다. 이를 각 풍력터빈의 에러로그를 이용하여 산출된 기술가동률과 비교하고자 한다.

1) 1년 가동률 비교

Fig. 12는 5호기의 SCADA시스템에서 제시하는 가동률(SCADAGA동률)에 대해서 A운전가동률과 기술가동률로 비교하여 보여주고 있다. SCADAGA동률은 기술가동률보다 0.2%가 낮았고 큰 차이를 보이지 않았지만 A운전가동률보다는 18.9% 높았다. 이는 SCADAGA동률은 에러가 발생하거나 수동정지 한 경우에만 정지시간으로 작용하여 대기상태나 저풍속의 경우에는 가동시간에 포함되는 반면에 A운전가동률은 최대성능 발전 범주만 가동시간에 적용하여 가동률을 산출하였기 때문이다.

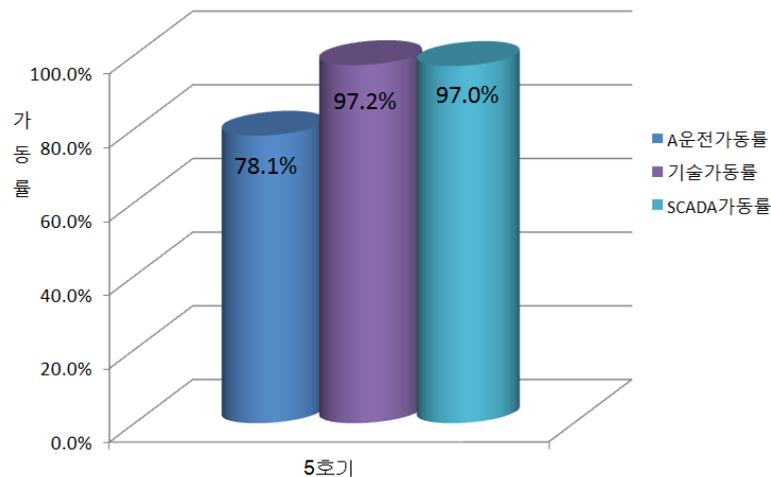


Figure 12 Comparison of availabilities at wind turbine No.5

Fig. 13은 6호기의 SCADA가동률과 산출된 가동률을 비교하고 있다. 기술가동률은 1%의 차이로 거의 비슷하고, SCADA가동률은 A운전가동률 보다 38.5%가 높다.

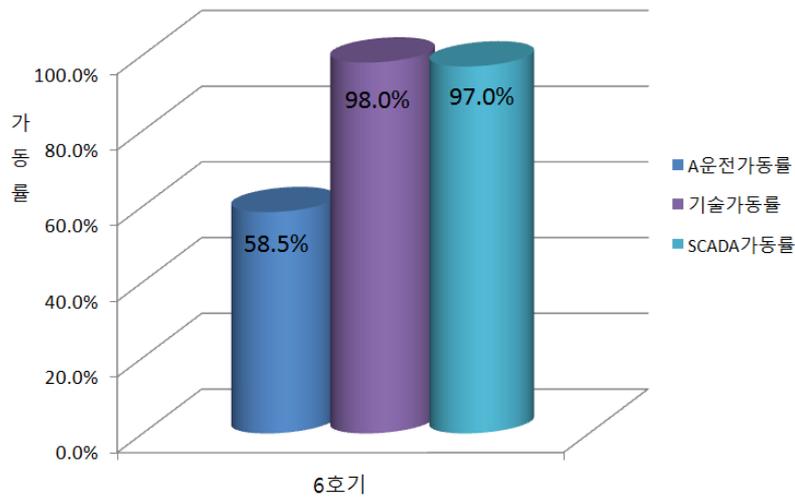


Figure 13 Comparison of availabilities at wind turbine No.6

2) 월별가동률 비교

Fig. 14는 5호기에 대한 월별 기술가동률과 SCADA가동률이다.

대부분의 달에서 기술가동률과 SCADA가동률이 비슷하고 10월의 경우에만 차이를 보이고 있다. 이는 10월에 계획정비가 있었기 때문이다.

10월 동안 계획정비 범주가 28.5시간(3.8%), 강제정지범주는 58.5시간(7.9%)이 포함되어 있다. 기술가동률 계산 시에는 계획정비는 계산에서 배제되고 강제정지는 비가동 시간에 해당한다. 10월 동안 58.5시간의 강제정지가 비가동률에 기여하는 정도는 약 8.2%이다. 따라서 10월 기술가동률은 91.8%이다. 5호기의 SCADA시스템은 풍력터빈이 수동정지한 경우에 정지한 것으로 계산한다. 10월 한 달간 에러 정지시간이 83.3시간(11.2%)이며 SCADA가동률은 88.8%이다. 기술가동률은 계획정비에 대해서는 가동률 계산식에 적용하지 않으나 5호기 SCADA시스템은 계획정비와 강제정지범주에 해당하는 시간을 모두 정지시간으로 계산

하고 있기 때문에 약 3%의 차이를 보이고 있다.

7월과 8월의 가동률이 다른 달에 비해서 낮게 나타나는 것은 주로 전력변환장치(PCS)의 냉각수 온도 상승에 따른 정지시간에 때문이다.

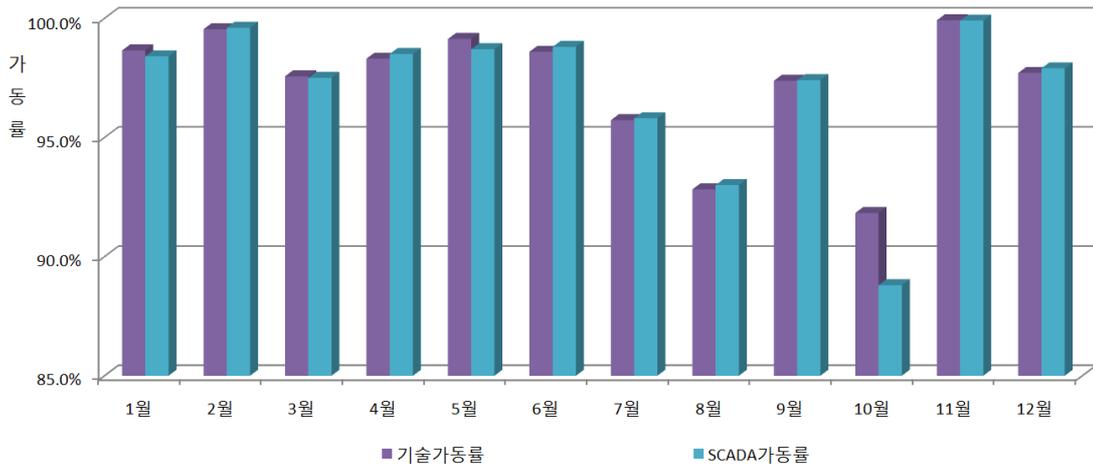


Fig. 14 SCADA and technical availability with month at wind turbine No.5

Fig. 15는 6호기의 월별 SCADAg동률과 기술가동률이다. 전체적으로 SCADAg동률이 기술가동률에 비하여 낮게 산출됨을 알 수 있다.

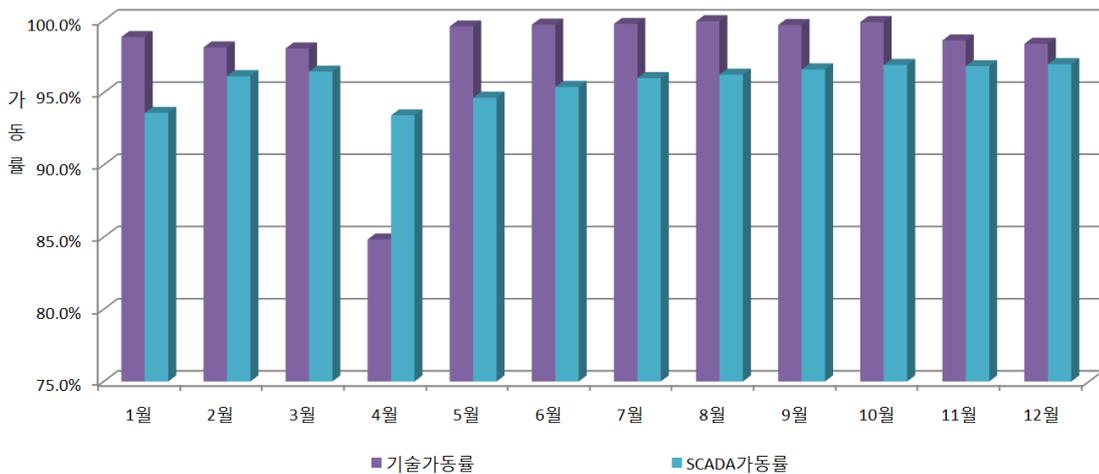


Fig. 15 SCADA and technical availability with month at wind turbine No.6

1월에는 블레이드 점검 등 계획정비 범주에 분류된 시간(63시간)을 포함하고 있고 계획수정 조치는 없었으며 강제정지 범주에 해당하는 시간은 7시간이다. 따라

서 SCADA가동률은 감소했지만 기술가동률은 다른 달과 비교하여 비슷한 값을 보였다.

4월의 경우에는 계획정비(29시간)와 함께 계획수정 조치 범주(77시간)가 있었기 때문에 기술가동률이 다소 떨어졌고 SCADA가동률은 기술가동률에 비하여 많이 감소하지 않았음을 확인할 수 있다. 그 이유는 대다수의 풍력터빈에서와 마찬가지로 6호기의 SCADA시스템이 유지보수 모드로 풍력터빈을 정지한 경우에는 가동률 산출 시에 정지시간으로 적용되지 않기 때문이다. 따라서 실제로는 정지시간이 많다하더라도 유지보수모드일 경우에는 높은 가동률을 보일 수 있다.

따라서 IEC TS 61400-26-1에서 제시하는 가동률 산출 방법에 따르는 경우, 보다 더 실제적인 가동률을 산출 할 수 있다.

VI. 결 론

본 연구는 동일 풍력발전단지 내에 인접하고 있는 서로 다른 기종의 풍력터빈에 대해서 시간에 따른 가동률 산출 절차와 방법을 규정하고 있는 IEC TS 61400-26-1에 따라 각각의 가동률을 산출하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 가동률 산출에는 2014년 1월 1일에서 12월 31일까지의 1년간 풍력터빈 SCADA시스템의 에러로그 데이터 그리고 풍력터빈에 대한 조치사항과 풍력발전단지의 환경조건에 대한 기록을 이용하였다. 이를 IEC TS 61400-26-1에서 제시하는 시간이 할당된 정보범주 별로 분류하였고, 각 가동률에 따른 산출 식에 적용하여 운전가동률과 기술가동률을 얻을 수 있었다.

2) 각 풍력터빈별로 할당된 정보범주 시간들을 서로 비교하였다. 가장 큰 차이를 보이는 것이 최대성능 발전범주와 기술적 대기 범주이다. 이 두 범주가 전체 시간에서 차지하는 비율은 5호기는 95.9%, 6호기는 94.1%이다. 최대성능 발전 범주의 경우는 5호기가 6호기에 비해 1,686시간(19.2%)이 많고, 기술적 대기 범주는 1,527시간(17.4%)이 적었다.

산출된 기술가동률은 5호기 97.2%, 6호기 98.0%로 거의 비슷하나 운전가동률은 5호기가 78.1%~78.7%, 6호기의 경우는 58.5%~61.0%로 많은 차이가 있었다. 이는 기술가동률 산출에는 최대성능 발전과 기술적 대기 모두 가동시간으로 계산하지만, 운전가동률에서는 기술적 대기는 정지시간으로 계산하기 때문이다.

3) 월별로 산출된 가동률에 의해서 풍력터빈의 가동상황을 알 수 있었다. 6호기에서 1월에는 A운전자동률이 43.1%, 기술가동률이 98.9%이었고 계획정비의 영향으로 운전가동률은 감소하였으나 기술가동률은 비슷하였다. 또 4월은 운

전가동률이 47.8%, 기술가동률이 84.8%로 둘 다 낮은 경향을 보이고 있는 데, 이는 계획정비와 함께 계획수정조치가 있었기 때문이다.

4) 산출된 가동률과 SCADA가동률을 비교해 볼 수 있었다. 연구 대상 기간인 1년간 두 풍력터빈의 SCADA가동률은 모두 97%였고, 기술가동률은 5호기가 97.2%, 6호기가 98.0%이었다. 따라서 거의 비슷한 수준임을 보이고 있었다. 하지만 월별로 가동률을 비교하였을 때 다소 다른 점을 발견할 수 있었다. 5호기의 경우에는 10월에 계획정비 기간의 정지시간을 SCADA시스템에서는 가동하지 않은 것으로 계산하여 기술가동률보다 낮은 값을 보이고 있었다. 6호기의 경우에는 전체적으로 SCADA가동률이 기술가동률보다 낮은 경향을 보이고 있었다. 4월의 경우를 보면 SCADA가동률(93.4%)이 기술가동률(84.8%)보다 다소 높다. 이는 풍력터빈이 유지보수 모드로 정지할 경우에 SCADA시스템이 실제로는 정지한 시간을 가동시간으로 산정하기 때문이다.

5) 앞서 제시한 결과와 같이, IEC TS 61400-26-1에 따라 가동률을 산출하고 그 유효성을 분석한 결과 풍력터빈의 가동상황에 대해서 보다 더 실질적으로 알 수 있어 충분한 유효성이 있음을 확인할 수 있었다. 산출된 가동률은 시간에 기초한 것이기 때문에 풍력터빈의 발전특성을 반영하는 출력량과는 정확한 상관관계가 있다고 할 수는 없지만, 시간에 관련한 풍력터빈의 가동성능과 풍력터빈의 관리측면에서는 유용한 방법이라 할 수 있다.

참고문헌

- [1] 신·재생에너지센터, “2014 신·재생에너지 백서”, 산업통상자원부/신·재생에너지센터, 2014
- [2] 고경남, 김남형, 양순보, “해상풍력발전”, 씨아이알, 2015
- [3] 신·재생에너지센터, “신·재생에너지 동향자료”, 신·재생에너지센터, 2014, p12
- [4] G.J.W. van Bussel, M.B. Zaaijer, “Reliability, Availability and Maintenance aspects of large-scale offshore wind farms, a concepts study”
- [5] G.J.W. van Bussel, “Offshore Wind Energy, the Reliability Dilemma”, Proceedings of the International conference, 2002
- [6] International Electrotechnical Commission, “IEC TS 61400/series, 1st ed. wind turbines - Part 26-1 : Time/based availability for wind turbine generating systems”, 2011
- [7] 한국기술표준원, “KS C IEC TS 61400-26-1”, 2014
- [8] S. Vittal, M. Teboul, “Performance and Reliability Analysis of Wind Turbines using Monte Carlo Methods based on System Transport Theory”, Americal Institute for Aeronautics & Astronautics, 2004
- [9] J.K. Kaldellis, D. Zafirakis, “The influence of technical availability on the energy performance of wind farms : Overview of critical factors and development of a proxy prediction model”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013
- [10] B. Hahn, Michael Durstewitz, Kurt Rohrig, “Reliability of Wind Turbines”, Wind energy, 2007
- [11] K. Harman, R. Walker, Michael Wilkinson, “Availability Trends Observed At Operational Wind Farms”, European Wind Energy Conference, 2008
- [12] A. Albers, “O&M Cost Modelling, Technical Losses and Associated Uncertainties”, European Wind Energy Conference, 2009
- [13] P. Chaves-Schwiteck, K. Monnich, “Temporal & Energetic Downtime

- Losses and its Influence on Wind Farm Economics”, DEVI-Magazin, No. 42, 2013
- [14] 부정환, “제주 가시리풍력발전단지의 1.5MW 풍력발전기 발전량 특성 분석”, 제주대학교, 2012
- [15] 위키백과, “SCADA”, <https://en.wikipedia.org/wiki/SCADA>, (2015. 11)
- [16] 고경남, 허종철, “풍력발전기의 운전, 유지보수, 점검, 정비”, 문운당, 2014
- [17] 김동욱, 송재주, 정남준, 최효열, “대규모 해상풍력발전단지 운영을 위한 SCADA시스템 설계”, 정보처리학회논문지, 제1권 제3호, 2012
- [18] 김영곤 외 4인, “이기종간의 상호운용을 지원하는 풍력발전 통합 SCADA시스템에 관한 연구”, 한국태양에너지학회 논문집, Vol.33, No.6, 2013
- [19] C. Jenkins, “Bently Nevada Wind CMS Offerings”, Sandia National Laboratories Wind Plant Reliability Workshop, 2013
- [20] 고경남, 강문중, 허종철, “제주 행원 풍력발전단지의 연도별 시스템 운전특성 분석”, 한국태양에너지학회 논문집, Vol. 28, 2, 2008
- [21] 주범철, “복잡지형 풍력단지에서의 WAsP 및 CFD 모델 예측성능 평가”, 제주대학교, 2015
- [22] 신동현, “나셀풍속을 이용한 풍력터빈의 성능저하 분석”, 제주대학교, 2015
- [23] “Wind Turbine Availability and Warranty”, Windgineer, 2009
- [24] G.J.W. van Bussel, Chr. Schontag, “Operation and Maintenance Aspects of Large Offshore Windfarms”, EWEC Conference, 1997
- [25] A. Williams, “Improving wind farm availability”
- [26] “Operation and Maintenance Agreement Issues for Wind Turbines”, Clifford Chance, www.cliffordchance.com, 2012
- [27] A. Albers, G. Gerdes, “Wind Farm Performance Verification”, DEWI Magazin No. 14, 1999

감사의 글

산업대학원 풍력공학과에서 공부한 지난 3년간의 시간은 대학 졸업 후 오랜 시간 일을 해왔던 저에게 다시 찾아온 배움의 기쁨을 만끽할 수 있었던 아주 뜻 깊은 시간이었습니다. 풍력에 대해 전문적으로 연구하고 열정을 쏟고 계시는 교수님들이 계신 풍력 관련 특성화대학원에서 여러 학생들과 공부할 수 있는 기회를 가질 수 있었던 것은 너무나도 감사한 일이었습니다.

먼저, 많이 부족하고 모자란 저의 논문을 바쁘신 와중에도 세심하게 신경써 주신 저의 지도 교수님, 고경남 교수님께 존경과 감사의 말씀을 올립니다. 아울러 제주 풍력의 원대한 꿈을 알려주신 허종철 교수님, 풍력관련 전문지식을 가르쳐주신 김범석 교수님과 김세호 교수님, 이개명 교수님, 김호민 교수님, 양경부 팀장님께도 깊은 감사를 전하고 싶습니다. 그리고 논문 작성에 도움을 주신 신동현, 주범철 연구원에게도 감사의 인사를 전하고 싶습니다.

그리고, 이성구 사장님과 김인행 팀장님을 비롯한 회사 직원 여러 분들께도 감사의 말씀을 전합니다. 팀원 분들의 도움 덕분에 무사히 저의 논문을 마칠 수 있었습니다.

바쁘다는 핑계로 많이 돌봐주지 못했던 우리 아들 연우를 포함한 사랑하는 아내와 가족들에게도 감사의 마음을 전하고, 이 글을 빌어 앞으로 더욱 성실한 가장이 되겠다고 다짐하겠습니다.

끝으로 다방면으로 도움을 주신 모든 분들께도 고마운 마음을 전하며, 감사의 글을 마무리 합니다.

2015. 12월

이 항 구