풍력발전시스템 출력에 대한 난류강도의 영향 연구

현승건*, 주영철**, 김건훈***

*한국에너지기술연구원(sghyun82@kier.re.kr), **한국에너지기술연구원(ycju@kier.re.kr),
***한국에너지기술연구원(kkh4417@kier.re.kr)

A Study on the Effect of Wind Turbulence Intensity on the Power Performance of Wind Turbine System

Hyun, Seung-Gun* Ju, Young-Chu** Kim, Keon-hoon***

*Korea Institute of Energy Research(sghyun82@kier.re.kr),

**Korea Institute of Energy Research(ycju@kier.re.kr),

***Korea Institute of Energy Research(kkh4417@kier.re.kr)

Abstract

The installed capacity of wind turbines in Korea are growing and enlarging by the central government's supporting program. But the majority area having the abundant wind energy resources is composed of mountainous and complex district, thus the turbulence intensity of there is so high and belongs to the turbulence characteristic A category of IEC design requirement. This paper presents the effect of the turbulence intensity on the power performance of a wind turbine system. Particularly, the effect of the power curve of the wind turbine system due to the turbulence intensity has analyzed. As a result, the power curve has a high turbulence characteristic shows the lower value than normal one in high wind speed regime and the AEP will be reduced at the relatively high turbulence area.

Keywords : 풍력발전기(wind turbine), 풍력발전기의 전기적 출력(power performance), 시험부지(test bed), 기상측정마스트(met. mast), 난류강도(turbulence intensity), 정규화(normalization)

1. 서 론

최근 연구동향에 따르면 풍력발전시스템은 신재생 에너지 중 가장 경제성이 우수하고 향후 기후협약에 대비한 청정 에너지원으로서 부각이 되고 있다. 그러나 우리나라는 지형

특성상 풍력 에너지 밀도가 지역에 따라 편차가 크고 풍력발전시스템의 피로하중과 극한하중에 큰 영향을 주는 난류강도도 각각의 지역마다 다르므로 국내 개발품이나 외국 도입 풍력발전시스템 적용 시 적합성 및 효율성에 문제 발생 소지가 있다. 따라서, 기존의 연구에

submit date: 2012. 3. 8, judgment date: 2012. 3. 15, publication decide date : 2012. 7. 16
communication author : Kim, Keon-Hoon(kkh4417@kier.re.kr)

서는 특이한 난류강도 하에서의 측정 자료를 제거하는 정도였으나¹⁾, 본 논문은 IEC와 같은 기관에서 국제 규격개정을 위한 기술검토 내용과 추세를 감안하여, 기존 측정 자료들에 대한 난류강도의 영향 부분만을 도출, 분석하여 산악지형과 같은 복잡한 지형에서의 출력 성능 시험의 결과에 대한 난류강도의 영향 등을 정량 분석하여 결과를 도출코자 한다.

본 논문은 2009년 9월 17일 0:00부터 2010년 2월 17일 02:40까지 약 5개월여의 기간 동안 현장에서의 성능시험과 이의 분석결과로서 난류강도에 따른 풍력발전시스템의 출력의 변화를 분석한 결과에 대해 논하고자 한다.

2. 연구배경

우리나라에서 많은 풍력자원을 가지고 있는 지역은 대부분이 복잡한 지형을 갖는 산악지형으로서 난류강도의 크기가 IEC Class A 혹은 S2)인 지역이 많이 있다. 난류강도는 평균풍속에 대한 변동풍속의 표준편차와의 비로 정의되어 다음의 식과 같다.

$$\text{Turbulence Intensity} : I = \frac{\sigma}{V}$$

다음의 Table 1과 Fig. 1과 같이 태백지역의 연 평균풍속은 6.75m/s, 풍력에너지 밀도는 434W/m²로 제주도 한수 지역보다 우수한 풍력자원을 갖고 있지만 제주도 한수지역에서의 난류강도는 풍속 15m/s에서 평균 난류강도인 TI_{mean}은 11.9%정도로 IEC Class 난류특성 C 카테고리인 지역이고 강원도 태백지역의 난류강도는 풍속 15m/s에서 평균 난류강도인 TI_{mean}은 17.2%로 IEC Class 난류특성 S 카테고리인 지역이다.

- 1) Kim, K. H. and Hyun, S. G., "Power Performance Testing and Uncertainty Analysis for a 3MW Wind Turbine", The Korean Solar Energy Society, Vol.30 No.6, 2010.
- 2) IEC 61400-1(3rd.) Wind turbines - Part1 : Design requirements, Aug. 2005.

이 두 지역의 지형을 보면 다음의 Fig. 2에서와 같이 제주도 한수지역은 주위가 평탄하고 기울기 변화가 적은 지형을 띄는 반면에 강원도 태백지역의 지형은 기울기 변화가 심하고 주위의 산들로 인해 아주 복잡한 지형을 띤다.

Table. 1 Wind condition comparison

		태백	한수
Location (WGS 84 UTMZone:52)	Latitude	4132476	3701664
	Longitude	500909	245199
Yearly Average Wind Speed at 60m [m/s]		6.75	6.31
Wind Power Density at 60m [W/m ²]		434	313
Turbulence Intensity (Mean value) [%]		17.2	11.9

Fig. 1 Turbulence characteristics at 60m at Hansu and Taebak

Fig. 2 Topographical distribution at Hansu and Taebak

이렇게 지형적인 영향으로 난류강도가 세지면서 Fig. 3과 같이 각 지역에서의 바람의 난류분포도 다르다. 한수지역에서는 난류강도가 13%미만인 바람이 약 59%이고 난류강도가 15%를 넘는 바람이 약 11.5%인 반면 태백지역에서는 난류강도가 13%미만인 바람이 약 28%이고 난류강도 15%이상인 바람은 전체의 약 64.5%나 차지한다.

Fig. 3 Turbulence distribution at 60m at Hansu and Taebak

이와 같이, 우리나라는 산악지역이 많고 태풍의 직접적인 영향을 자주 받아 각 지역에 따라 난류강도의 세기는 각각 다르다. 하지만 현재 풍력단지 개발에 앞서 연간 에너지생산량 예측과 경제성분석에 사용되는 풍력발전시스템의 출력곡선은 해당지역의 난류 강도를 고려하지 않고 표준화된 출력곡선을 이용하여 계산 혹은 예측됨에 따라 발전량 예측에 대한 신뢰도가 떨어질 뿐만 아니라 분석에 대한 불확실성³⁾이 증가하고 잘못된 분석으로 인해 투자자들에게 불확실한 정보를 제공할 수 있기 때문에 난류강도가 풍력발전시스템 출력에 미치는 영향을 분석하여 이에 대한 기술적 이해도를 높일 필요가 있다.

3. 시험기기 및 시험부지 현황

3.1 시험 대상 풍력발전시스템

시험대상 풍력발전시스템인 V사의 V90은 정격용량이 3MW로 블레이드 직경이 90m이고 허브높이는 80m이다. 시동 풍속과 중단

풍속은 4m/s, 25m/s이고 피치제어를 통해 출력을 제어하는 풍력발전시스템이다.

3.2 시험기기의 위치 및 지형 변화도

시험부지의 지형변화도는 IEC61400-12-1 Annex B의 Table B.1 - Test site requirements : topographical variations⁴⁾의 정해진 조건을 만족하는 지형이다. Met. Mast 및 성능 시험대상 풍력기기 주변의 장애물에 대한 평면도상의 배치현황은 Fig. 4와 같다.

3.3 유효 방위각

IEC61400-12-1 Annex A에 의거하여 시험기기에 대한 풍향의 유효방위각을 설정하여야한다. 다음의 Fig. 4에서 시험부지의 장애물 분포를 보이고 있다.

주변의 지형 및 지물로부터 영향을 받는 풍향은 시험기기와 met. mast에 대한 다른 지형 및 지물의 상대적인 위치(거리 및 각도)에 의해 결정되게 된다.

$$\text{disturbed sector } \alpha = 1.3 \text{Arctan} \left(\frac{2D_n}{L_n + 0.15} \right) + 10$$

따라서 현지에서의 분석에 의해 측정시험시의 유효방위각은 252°~47°로서 결정 되었다.

Fig. 4 Obstacles distribution around the test bed

3) Kim, K. H. and Hyun, S. G., "A Study for the Effect on the Uncertainty of Power Performance Testing of Windturbine by a Site Calibration", The Korean Solar Energy Society, Vol.31 No.2, 2011.

4) IEC 61400-12-1 Wind turbines(1st ed.) - Part 12-1-1 : Power performance measurements of electricity producing wind turbines, Dec. 2005.

4. 시험자료의 분석

4.1 시험 자료 보정

모든 측정절차와 방법은 IEC 61400-12-1의 규격에 따라 시행하며, 표준대기상태[공기 밀도 1.225kg/m^3 , 15°C (dry air), 101.3kPa]로의 보정은 다음과 같다.

(1) 표준 공기밀도 (1.225kg/m^3)상태로 보정

$$\rightarrow \text{공기 밀도} : \rho_{10\text{min}} = \frac{B_{10\text{min}}}{R \cdot T_{10\text{min}}}$$

$\rightarrow$ 피치제어 방식 풍력기기 풍속 보정

$$V_n = V_{10\text{min}} \left(\frac{\rho_{10\text{min}}}{\rho_0} \right)^{1/3}$$

(2) 측정 출력 곡선은 0.5m/s 간격 bin을 사용하여 보정된 풍속과 출력의 평균값의 산정으로 결정

$$\rightarrow \text{풍속의 산정} : V_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} V_{n,i,j}$$

$$\rightarrow \text{출력의 산정} : P_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} P_{n,i,j}$$

(3) 연 에너지 생산량(AEP)은 측정된 출력곡선과 Rayleigh 분포의 풍속 확률 밀도 함수로써 산정됨

$\rightarrow$ 연간 발전량 산정 기준

$$AEP = N_h \sum_{i=1}^N [F(V_i) - F(V_{i-1})] \left(\frac{P_{i-1} + P_i}{2} \right)$$

$\rightarrow$ 풍속의 Rayleigh 누적 확률 분포 함수

$$F(V) = 1 - \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{V}{V_{ave}} \right)^2 \right]$$

(4) 출력계수는 측정된 출력곡선에 의해 산정됨

$$\rightarrow \text{출력계수} : C_{p,i} = \frac{P_i}{\frac{1}{2} \rho_0 A V_i^3}$$

(5) 정격출력에 대한 발전량의 비율

$$\rightarrow \text{이용률(Capacity Factor): } CF = \frac{AEP}{P \times t}$$

4.2 시험자료군 및 결과

다음의 Fig. 5에는 보정후의 유효방위각 내의 풍속분포를 보이고 Fig. 6에는 풍속에 대한 모든 출력 측정 자료를 함께 표시하고 있다.

Fig. 5 Wind speed distribution in Undisturbed sectors

fig. 6 Power output data for the wind speed

5. 시험 결과 및 고찰

5.1 시험자료의 난류강도별 분류

시험 자료에서 풍속에 대한 난류 강도의 분포를 분석한 결과 다음의 Fig. 7과 같이 15% (평균 난류강도 18%) 이상인 자료군은 3.57%로 가장 적었고, 13%에서 15% (평균 난류강도 14%)인 자료군은 5.86%로 나타났으며, 난류강도가 13% (평균 난류강도 9%) 이하인 자료군은 90.56%로 가장 많이 나타났다.

여기서 난류강도별 출력곡선을 비교하기 위한 기준은 IEC 61400-1(3rd.) Wind turbines

- Part1 : Design requirements에서의 풍력발전시스템 Class 분류에서 중 난류 특성의 B 카테고리인 14%(mean value)를 기준으로 하였다.

Fig. 7 Turbulence intensity distribution of test data

5.2 난류강도별 출력곡선

본 시험을 통해 측정된 풍속을 보정한 bin 구간별 난류강도에 따른 출력곡선의 비교는 다음의 Fig. 8과 같은데 낮은 풍속에서 저 난류 특성의 출력곡선이 낮은 출력을 보이고 높은 풍속에서 비교적 높고 안정적인 출력을 보이고 있다. 또한 이와 반대로 고 난류 특성의 출력곡선은 낮은 풍속 구간에서 보다 높은 출력을 보이고 있으나 높은 풍속으로 갈수록 비교적 출력이 낮게 나타나고 있다. 이는 저 풍속 상태이지만, 고 난류강도 특성의 풍속조건이 저 난류강도 특성의 풍속조건 보다 더 많은 풍력 에너지를 갖고 있기 때문으로 분석할 수 있으며, 정격풍속과 같은 높은 풍속조건하에서는 고 난류강도 특성 풍속에 의한 출력의 변동성 때문에 풍력시스템의 제어기능이 저 난류강도 특성 풍속 조건에 비해 일찍 작동하여 출력제어를 하기 때문이다. 그리고, 정격풍속 보다 큰 풍속조건에서는 고 난류강도 특성에 의한 출력 변화가 심하여 풍력시스템의 출력 제어응답성이 충분히 크지 못하기 때문에 출력의 변동성이 커지는 것으로 볼 수 있다. 이는 다음의 Fig. 9의 S사에서 계산되어 제시한 난류강도별 출력곡선의 경향과 매

우 흡사한 경향을 보이고 있어 비교될 수 있다.

Fig. 8 Power curve of each turbulence intensity

Fig. 9 Power curve of each turbulence intensity of S company⁵⁾

5.3 난류강도별 출력계수 곡선

난류강도에 따라 분석된 출력계수 곡선의 비교를 Fig. 10에서 보이고 있는데, 위의 출력곡선 비교에서와 같이 저 풍속 일 때 고 난류 특성군의 출력계수가 비교적 높지만 고 풍속으로 갈수록 변동이 심하고 비교적 낮은 출력계수를 보이고 있다.

5) Samsung Heavy Industries "Technical Documentation for Samsung Wind Turbine 2.5MW", 2011.

Fig. 10 Power coefficient curve of each turbulence intensity

5.4 연간 에너지 생산량

시험을 통해 측정된 각 난류강도 출력곡선에 대해 풍속을 Rayleigh 분포로 가정하고, 시험 대상 풍력발전시스템의 가동률을 100%로 가정한 연간 에너지 생산량 분석 결과와 이용률을 다음의 Table 2와 Table 3에서 보이고 있다.

연 평균 풍속이 4~5m/s의 낮은 경우에는 $TI > 0.15$ 에서 비교적 높은 AEP를 보이고 있으나, 높은 연 평균 풍속으로 갈수록 $0.13 < TI < 0.15$ 인 출력곡선의 AEP가 비교적 높은 AEP를 보이고 있다.

또한, 설비 이용률 역시 연간 에너지 생산량과 같은 추세를 보이고 있다.

Table 2 Comparing annual energy production of each turbulence intensity

Annual Energy Production [MWh/yr]							
연 평균 풍속 [m/s]	제작사 제시	$TI < 0.13$	비고 [%]	$0.13 < TI < 0.15$	비고 [%]	$0.15 < TI$	비고 [%]
4	1,585	1,018	64.2	1,418	89.5	1,429	90.2
5	3,657	2,740	74.9	3,112	85.1	3,117	85.2
6	6,035	4,876	80.8	5,217	86.4	5,171	85.7
7	8,443	7,168	84.9	7,466	88.4	7,346	87.0
8	10,667	9,391	88.0	9,641	90.4	9,449	88.6
9	12,572	11,392	90.6	11,596	92.2	11,347	90.3
10	14,080	13,076	92.9	13,239	94.0	12,952	92.0
11	15,164	14,394	94.9	14,522	95.8	14,214	93.7

Table 3 Comparing capacity factor of each turbulence intensity

연 평균 풍속 [m/s]	Capacity Factor [%]						
	제작사 제시	TI<0.13	비고 [%]	0.13<TI <0.15	비고 [%]	TI>0.15 비고 [%]	
4	6.03	3.87	65.0	5.40	90.0	5.44	90.0
5	13.92	10.43	74.8	11.84	84.9	11.86	85.6
6	22.96	18.55	80.8	19.85	86.5	19.68	85.7
7	32.13	27.28	85.0	28.41	88.5	27.95	87.2
8	40.59	35.73	87.9	36.69	90.4	35.96	88.7
9	47.84	43.35	90.6	44.12	92.3	43.18	90.4
10	53.58	49.76	92.9	50.38	94.0	49.28	92.0
11	57.70	54.77	95.0	55.26	95.8	54.09	93.8

6. 결 론

풍력발전시스템의 성능시험에서 측정된 자료를 기반으로 난류 강도별 출력곡선 및 연간 발전량을 분석한 결과는 다음과 같다.

저 난류 특성의 출력곡선은 낮은 풍속에서는 낮은 수치를 보이나 정격풍속 부근의 높은 영역에서는 상대적으로 높고 안정적인 출력을 보이고 있다. 이와 반대로 고 난류 특성의 출력곡선은 낮은 풍속 구간에서는 높은 수치를 보이나 높은 풍속으로 갈수록 상대적으로 낮은 출력과 큰 변동성을 나타내고 있다. 아울러, 직접적인 풍력발전시스템의 운전성능인 연간발전량과 이용률은, 연평균 4~5m/sec의 낮은 연 평균 풍속 영역에서는 상대적으로 많은 에너지를 갖는 고 난류강도 풍속조건 하에서 이용률로서 약 1.5% 내외의 높은 수치를 보이고 있으나, 연 평균 풍속이 증가할 수 록 중간 정도의 난류강도가 가장 많은 발전량과 0.5~1.0% 정도 높은 이용률을 보이고 있다. 이는 높은 풍속조건하에서의 큰 난류강도에 의한 출력변동성이 작고 낮은 난류강도에 비해 상대적으로 높은 풍력에너지를 갖고 있음에 기인한다고 할 수 있다.

Reference

- Kim, K. H. and Hyun, S. G., "Power Performance Testing and Uncertainty

- Analysis for a 3MW Wind Turbine”,
The Korean Solar Energy Society,
Vol.30 No.6, 2010.
2. IEC 61400-1(3rd.) Wind turbines – Part1
: Design requirements, Aug. 2005.
 3. Kim, K. H. and Hyun, S. G., "A Study for
the Effect on the Uncertainty of Power
Performance Testing of Windturbine by a
Site Calibration", The Korean Solar Energy
Society, Vol.31 No.2, 2011.
 4. IEC 61400-12-1 Wind turbines(1st ed.) – Part
12-1-1 : Power performance measurements
of electricity producing wind turbines,
Dec. 2005.
 5. Samsung Heavy Industries "Technical
Documentation for Samsung Wind Turbine
2.5MW", 2011.