

소형 풍력발전시스템의 출력성능검사

Power performance Testing of Small Wind Turbine Generator System

김 현 기* 김 병 민* 유 능 수**
Kim, Hyeon-Ki Kim, Byeong-Min Yoo, Neung-Soo

Abstract

In this study, procedures, a power performance testing system of Wind Turbine System Research Center of Kangwon National University is introduced. Test procedures and results are presented on a stand-alone vertical-axis 200W wind turbine manufactured by Geum-Poong Energy Inc.. Power performance test is performed according to IEC standard. The test results are compared with the power performance standard. Also, the effects of normalization and disturbed sectors are considered.

키워드 : 출력성능검사, 소형풍력발전시스템, 출력성능곡선, 출력계수, 연간에너지생산량, 표준화, 교란영역

Keywords : *Power performance testing, Small wind turbine generator system, power curve, Power coefficient, Annual energy production, Normalization, Disturbed Sector*

1. 서론

오늘날 세계적으로 기존의 화석연료를 대체할 수 있는 신·재생에너지 개발이 활발히 진행 중이다. 그중에서 무한정의 청정에너지인 풍력에너지를 이용하여 에너지를 생산하는 풍력발전 시스템이 여러 신·재생에너지중 가장 각광받고 있다. 이미 풍력발전시스템은 세계적으로 육상 및 해상에 걸쳐 널리 설치 운영되고 있다. 풍력발전시스템은 생산되는 발전량에 비해 차지하는 면적이 작아 부지를 효율적으로 운영할 수 있다는 장점이 있다. 또한 풍력발전 시스템은 세계적으로 지속적인 대형화가

이루어지는 추세이다. 하지만 이러한 대형풍력발전 시스템의 설치의 제약이 있는 도서지역과 같은 오지에서는 동력 공급원으로써 소형풍력발전시스템의 사용이 효과적 일수 있다. 특히 해외에서는 개인용 자가발전이나 보조 동력원의 확보를 목적으로 소형풍력발전 시스템이 많이 사용되고 있으며 시장의 규모 또한 성장하고 있다. 이러한 세계적 동향에 발맞추어 국내에서도 현재 소형풍력발전시스템 개발이 이루어지고 있다. 일반적으로 풍력발전시스템은 회전자(Rotor)축 방향에 따라 수직축 풍력발전기(VAWT : Vertical Axis Wind Turbine)와 수평축 풍력발전기(HAWT : Horizontal Axis Wind Turbine)로 구분되며 운전 형태에 따라 독립형과 계통연계형으로 구분할 수 있다. 또한 정격출력이 30kW 미만의 소형풍력발전기와 그이상의 중대형 풍력발전기로 구분할 수 있다. 본 연구는 소형풍력발전시스템 성능검사 기관인 강원대학교 풍력발전 시스템연구센터에서 수행

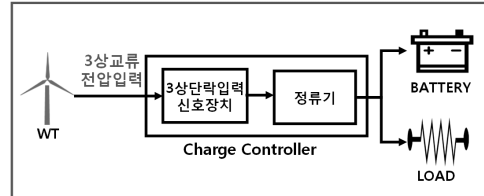
* 강원대학교 기계메카트로닉스 공학과 대학원
** 강원대학교 기계메카트로닉스 공학과 교수,
공학박사(yoonsoo@kangwon.ac.kr), 교신저자

한 (주)금풍에너지의 정격출력 200W의 독립형 수직축 소형풍력발전시스템(모델명: GWE-200BI)의 출력성능검사 과정과 결과를 대상으로 하여 기술하였다.

기적 브레이크를 통한 제동력을 발생시켜 풍력발전기 로터의 회전을 정지시키는 보호기능이 있다. 표 1과 그림 3은 GWE-200BI의 사양 및 소형풍력발전시스템의 모습에 대한 것이다.

2. 성능검사 개요

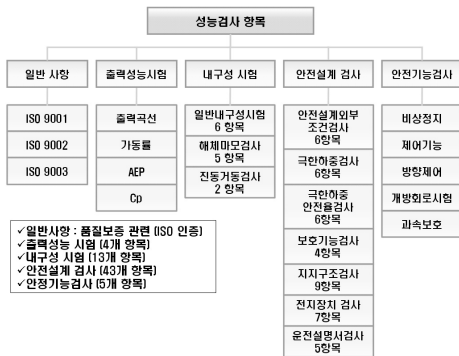
소형풍력발전시스템의 성능검사는 크게 출력성능검사, 내구성 검사, 안전설계 검사, 안전기능 검사의 4가지로 분류되며 세부적으로는 66개 항목의 검사가 수행되었다. 이 항목은 IEC(International Electrotechnical Commission) 61400 시리즈를 기반으로 국내실정에 맞게 작성된 것이다(그림 1). 성능검사는 IEC 61400 시리즈를 기반으로 작성된 소형풍력발전시스템 설비검사 세부기준 및 풍력설비 성능검사기관 운영규정에 의거하여 수행되었다. 강원대학교 풍력발전 시스템 연구센터가 수행한 소형풍력발전 시스템 성능검사는 강원도 평창군 대관령면 (구)대관령 휴게소에 위치한 성능검사장(그림 3)에서 수행되었다.



[그림 2] 대상 풍력발전기의 장비 계통도



[그림 3] 200W 소형풍력발전시스템(GWE-200BI)



[그림 1] 소형풍력발전시스템 성능검사 항목

3. 소형풍력발전시스템 사양

(주)금풍에너지에서 제작한 GWE-200BI 모델의 정격풍속은 13.5m/s이고 정격출력이 200W인 수직축 소형풍력발전시스템이다. 또한 GWE-200BI는 축전지 충전형의 독립형 시스템이다. GWE-200BI는 로터(Rotor) 회전을 통해 3상 교류전압을 발생시킨 후 3상 단락입력 신호장치 및 정류기를 포함하고 있는 충전 조절장치를 거쳐 DC 24V 축전지 및 부하와 연결되도록 설계 되어있다(그림 2). 또한 지정된 풍속을 초과하여 발전기의 출력값이 제한된 값을 초과하게 되면 발전기의 과속보호 장치 및 제어부로부터 발전기의 3상전원을 단락시키고 전

표 1. GWE-200BI 사양

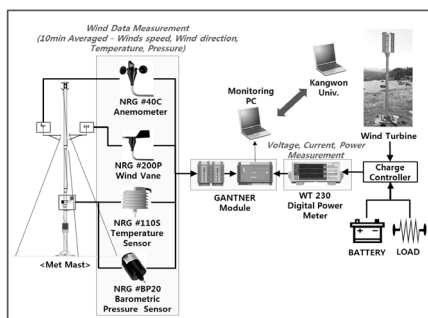
모델명	GWE-200BI
정격출력	200 (W)
회전자직경	0.9 (m)
회전자높이	1.2 (m)
회전자 면적 A	1.08 (m ²)
회전자 날개수	3 (개)
허브높이	4.8 (m)
발전기 무게	32 (kg)
시동풍속	3 (m/s)
정격풍속	13.5 (m/s)
중단풍속	18 (m/s)

4. 출력 성능검사 방법

4.1 출력성능검사 시스템 구성

GWE-200BI 소형풍력발전 시스템의 출력성능검사는 강원도 평창군 대관령면 황계리에 위치한 성

능검사장에서 수행되었다. 소형풍력발전 시스템의 성능검사를 수행하기 위해서는 대상 풍력발전기가 정격풍속에서 정격출력을 생산할 수 있는지에 대한 출력성능검사가 이루어진다. 또한 출력성능검사를 위해서 신뢰성 있는 풍황데이터 및 전력데이터의 측정이 필수적이다. 데이터 수집은 IEC 규정에서 규정하는 최소 1Hz 이상의 Sampling Time으로 이루어져야하며 온도나 압력 센서의 경우는 풍속 및 풍향 센서에 비해 시간에 따라 값의 변화하는 정도가 느리기 때문에 1/60Hz 이상의 Sampling Time을 허용한다. 출력성능 측정을 위한 대관령 성능검사장에 구축된 시스템은 그림 4와 같다.

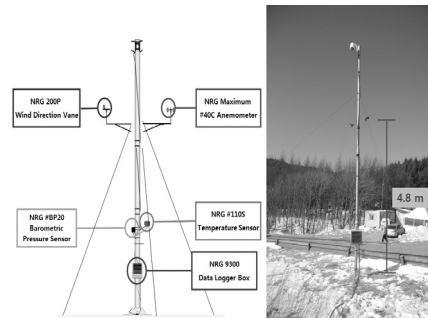


[그림 4] 소형풍력발전시스템 출력성능검사 시스템 구성도

그림 4에서 알 수 있듯이 기상계측타워에서 측정된 풍황데이터와 대상 풍력발전기에서 측정된 출력 데이터는 성능검사장 내에 설치된 독일 Gantner 사의 데이터 수집장치 및 모니터링 PC에 저장된다. 모니터링 PC는 NI사의 LabVIEW 프로그램 이용하여 Gantner 사의 데이터 수집장치와 연동되어 풍황 및 풍력발전기의 출력상태를 볼 수 있도록 구성되었다. 또한 대관령 성능검사장에 설치된 모니터링 PC는 강원대학교 풍력발전 시스템 연구센터 내에서 실시간 원격 접속을 통하여 데이터의 획득 및 확인이 가능하도록 구성되었다.

4.2 풍황 데이터 수집

GW-200BI 소형풍력발전 시스템의 출력성능검사를 위한 풍황데이터 수집을 위해서는 그림 5와 같이 대상풍력발전기의 허브높이와 동일한 높이에서의 풍황데이터 측정을 위한 기상계측타워의 설치가 필수적이다. 또한 주변의 지형 및 장애물로 인한 유동의 왜곡현상을 최소화하기 위한 위치선택이 필요하다. 이러한 세부적인 사항을 가장 만족시키는 위치에 기상계측타워를 설치하였다.



[그림 5] 성능검사장 내 풍황 계측타워의 모습

기상계측타워에는 NRG사의 풍속 및 풍향, 온도, 압력 센서가 각각 설치되었다(그림 5). 풍속 및 풍향센서는 대상 풍력발전기의 허브높이인 지상 4.8m 높이에 각각 설치되었으며 그밖에 온도와 압력센서는 지상 2m에 설치되었다. 각각의 센서로부터 출력되는 데이터는 1초 간격으로 Sampling되며, Sampling된 데이터는 10분 단위의 평균값 및 표준편차, 최대, 최소 값이며 이는 데이터 수집장치에 저장 된다.

4.3 출력 데이터 측정

성능검사를 위해서는 풍황데이터와 함께 출력데이터도 함께 동기화 시켜 측정이 이루어져야한다. 대상풍력발전기에서 출력되는 3상의 교류신호에 대한 전력데이터 및 전압, 전류를 측정하기 위해 YOKOGAWA사의 WT230 디지털 전력계가 사용되었다. 전력계를 통해 측정된 전력데이터는 1초 간격으로 Sampling되며 Sampling된 전력데이터는 10분 단위의 평균값과 표준편차, 최대값, 최소값의 형태로 저장된다. 기상계측타워를 통해 실시간으로 측정된 풍황데이터와 WT230 전력계를 통해 측정된 전력데이터는 데이터 수집장치로 입력이 되며 이는 풍속 대비 출력값의 형태로 저장된다.

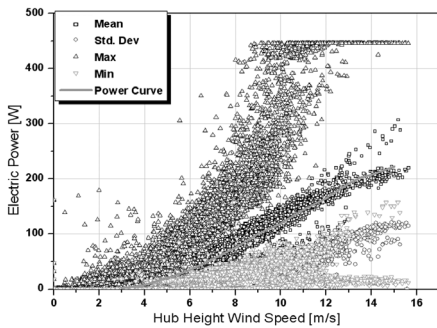
4.4 데이터 보정

그림 4와 같은 절차를 통해 얻어진 풍황 및 출력에 대한 Raw Data는 출력성능검사를 위해 소형 풍력발전 시스템의 정상적인 작동 상태에서 측정이 이루어진 데이터로만 구성이 되어야 한다. 따라서 간단한 후처리 과정을 거쳐 아래와 같은 항목에 해당하는 데이터를 제외한 후에 사용하여야 한다.

- 소형 풍력발전시스템의 작동 풍속영역에 포함되지 않는 Data
- 소형풍력발전 시스템의 고장이나 정비시에 측정된 Data
- Measurement Sector를 벗어난 영역의 Data

5. 출력 성능검사 결과

GWE-200BI의 출력성능검사는 풍속 대비 시스템의 출력값을 나타낸 출력곡선의 도출과 출력계수산출, 연간에너지 생산량의 예측을 통해 이루어진다. 또한 출력성능에 영향을 미칠 수 있는 여러 변수들 중에서 공기밀도가 출력에 미치는 영향과 교란영역에서 획득한 데이터가 출력값에 미치는 영향에 대해서 알아보았다. 출력성능검사에는 앞서 언급했던 측정 시스템을 사용하여 얻어진 1초 간격으로 Sampling 된 10분 평균 데이터를 사용하였다. 아래 그림 6은 측정시스템을 통해 얻어진 데이터의 평균, 표준편차, 최대, 최소값을 산점도(Sattered Plot)로 나타낸 것이다.



[그림 6] 실측 출력 Raw Data의 산점도(Scattered Plot)

소형 풍력발전시스템이 바람으로부터 회수하는 에너지는 공기밀도에 영향을 받는다. 따라서 지형의 고도차와 기후로 인해 생기는 밀도의 차이에 대한 출력값의 표준화(Normalization)가 필요하다. 공기밀도는 직접적으로 측정이 불가능하므로 식 1을 사용하여 대기밀도를 산출하였다.

$$\rho_{10} = \frac{B_{10}}{RT_{10}} \quad (1)$$

ρ_{10} : 실측 공기밀도의 10분 평균[kg/m³]

T_{10} : 실측 대기온도의 10분 평균 [K]

B_{10} : 실측 대기압력의 10분 평균 [Pa]

R : 공기 기체상수, 287.05 [J/kg·K]

출력값의 표준화(Normalization)는 발전기의 출력 제어 형태에 따라 두 가지 방법이 사용된다. 먼저 실속제어방식(Stall-Regulated)의 풍력터빈은 식 2를 사용하여 출력 데이터를 표준화 한다.

$$P_n = P_{10} \frac{\rho_0}{\rho_{10}} \quad (2)$$

P_n : 표준화시킨 풍력 터빈 출력 [W]

P_{10} : 실측 풍력 터빈출력의 10분 평균[W]

ρ_0 : ISO표준 대기밀도 [1.225 [kg/m³]

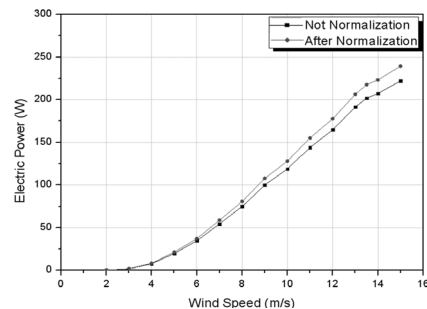
또한 액티브 피치제어(Active Pitch Control)를 사용하는 풍력터빈은 식 3과 같이 풍속 데이터를 표준화하여 출력을 표준화한다.

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

V_n : 표준화 시킨 풍속 [m/s]

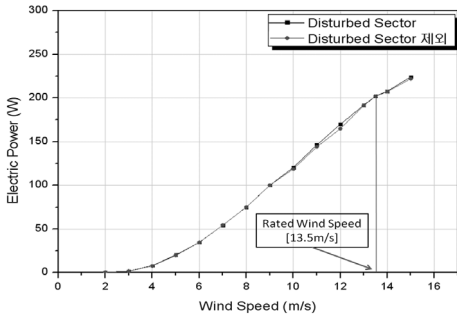
V_{10} : 실측풍속의 10분 평균 [m/s]

대상 풍력발전기인 GWE-200BI는 출력방식은 액티브피치제어가 아니므로 실속제어방식을 사용한다고 가정하였다. 이 경우는 식 2를 사용하여 출력데이터를 표준화 하여야 한다. 규정에 의하면 식 1을 이용하여 산출한 실측 공기밀도 ρ_{10} 과 표준 공기밀도인 $\rho_0=1.225\text{kg/m}^3$ 의 차이가 $\pm 0.05\text{kg/m}^3$ 범위 안에 있다면 표준화 과정을 생략해도 무방하다. 그러나 실측공기밀도가 표준대기밀도와 약 0.088kg/m³의 차이가 나므로 출력의 표준화를 수행하였다. 그림 7은 실측 출력곡선과 표준화과정을 거친 출력곡선을 비교한 그림이다.



[그림 7] GWE-200BI의 출력성능 곡선비교

출력성능 검사에서 사용된 데이터의 후처리 과정에서 Raw Data가 측정영역(Measurement Sector) 이외의 교란영역(Disturbed Sector)의 Data를 포함하고 있을 때 소형풍력발전 시스템의 출력에 미치는 영향을 알아 보고자 하였다. 아래 그림 8은 Raw Data에 교란영역을 제외 했을 때와 제외하지 않았을 때의 출력값을 비교한 결과이다.

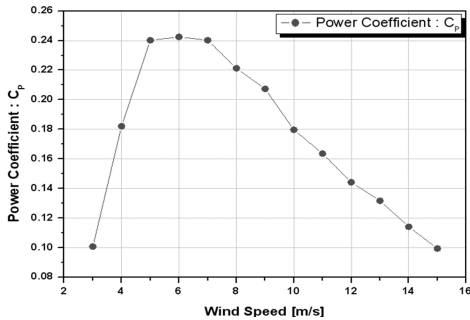


[그림 8] Disturbed Sector에 따른 출력값의 비교

앞서 산출한 출력곡선을 바탕으로 실측출력계수(Power Coefficient : CP)를 계산하였다. 출력계수는 식 4로 계산 되어질 수 있다.

$$C_p = \frac{P_e}{\frac{1}{2} \rho A V_{\infty}^3} \quad (4)$$

식 4에 따라 계산된 출력계수 곡선 및 출력계수 값은 아래 그림 9와 표 2에 나타내었다.



[그림 9] 실측 데이터를 이용한 출력계수 곡선

표 2. 실측값을 이용하여 계산한 출력계수

Wind Speed (m/s)	Cp
3	0.101
4	0.182
5	0.240
6	0.242
7	0.240
8	0.221
9	0.207
10	0.180
11	0.164
12	0.144
13	0.132
14	0.114
15	0.099

앞서 계산한 결과들을 이용하여 소형풍력발전시스템 GWE-200BI의 연간에너지 생산량(Annual Energy Production : AEP)을 예측할수 있다. 연간 에너지생산량의 예측은 IEC규정에 따라 대관령 성능검사장의 풍속분포를 Rayleigh분포로 가정하여 풍속의 출현률을 산출하였으며 아래의 표 3과 같이 8개 연평균 풍속에 대한 연간에너지생산량을 예측하였다.

표 3. GWE-200BI의 연간에너지 생산량 예측

V ₁₀ (m/s)	AEP (kWh/year)
4	150
5	274
6	410
7	531
8	620
9	671
10	690
11	685

6. 결론

(주)금풍에너지의 정격출력 200W의 독립형 수직축 소형풍력발전시스템을 이용하여 출력성능검사를 수행한 결과 아래와 같은 결과를 얻었다.

(1) 대상풍력발전기인 GWE-200BI의 출력성능 시험결과 정격풍속 13.5m/s에서 201.89W의 출력값을 확인 할 수 있었으며 이는 제작사인 (주)금풍에너지가 제시한 정격출력 200W와 약 0.95% 오차를 보이는 결과로써 출력성능검사 판정기준에 만족하는 결과이다.

(2) 출력성능검사에 영향을 미치는 공기밀도에 대해서 실제 측정된 출력값과 표준화(Normalization)한 출력값의 AEP를 산출하여 비교하여 보았다. 그 결과 표준화한 출력값의 AEP가 실제 측정된 출력값의 AEP보다 약 7%의 증가를 보였다.

(3) 출력성능검사에 사용하는 Raw Data에 Measurement Sector 이외의 영역 즉, 교란영역을 포함시켰을 경우 출력값과 교란영역을 제외시켰을 경우 출력값의 AEP를 산출하여 비교하여 보았다. 그 결과 교란영역을 포함시켰을 경우의 AEP값이 교란영역을 제외시켰을 경우의 AEP보다 약 1%의 증가를 보였다. 이는 대관령 성능검사장의 경우 주풍향이 서남서 풍이며 교란영역은 주풍향을 포함하고 있지 않으므로 출력의 영향을 크게 주지 않

은 것으로 판단된다. 이는 대관령 성능검사장에 해당하는 것이므로 타 사이트에서의 출력성능검사 시 교란영역의 고려가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2010(2차년도)년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2009T100100621)

참 고 문 헌

- [1] 유능수 외 “6kW급 소형 풍력발전기의 출력 성능 측정”, 한국풍력에너지학회 학술발표대회 논문집, pp.108-116, 2005.
- [2] 유능수, 윤광용 “풍향이 풍력발전기 출력에 미치는 영향에 관한 연구”, 한국풍공학회논문집, 제12권, 제2호, pp.75-83, 2008.
- [3] IEC, *Wind turbine generator system. Part 12 : Wind turbine power performance testing*, 1st Ed., IEC 61400-12, 1998.
- [4] 에너지관리공단 신재생에너지센터, *신재생에너지 설비심사세부기준 : 소형풍력발전시스템*, 2008.
- [5] 김건훈, 하종호, “소형풍력발전기 성능검사” 한국태양에너지학회, 2006년도 춘계학술발표대회 논문집, pp.115-120, 2006.
- [6] 남윤수, *풍력터빈의 제어*, 1판, GS인터비전, 2009.
- [7] National Renewable Energy Laboratory, *Wind Resource Assessment Handbook : Fundamentals for Conducting a Successful Monitoring Program*, NREL, 1997.
- [8] 이근대, 부경진, 이창훈 “신·재생에너지 전력 시장 활성화 방안”, 에너지 경제연구원 기본연구보고서, 2005-11.