

## 풍속 변화에 따른 발전기 온도 및 전력변환장치 효율에 관한 연구

(A Study on Generator Temperature and Power Converter Efficiency according to change of Wind Velocity)

송영상\* · 한운기 · 정진수 · 임현성 · 조성구 · 전태현

(Young-Sang Song · Woon-Ki Han · Jin-Soo Jung · Hyun-Sung Lim · Sung-Koo Cho · Taehyun Jeon)

### Abstract

Recently, because a renewable power source must operate as a constant rate in accordance with RPS(Renewable Portfolio Standard), the study of the renewable power sources has been ongoing. Especially because of noise of wind turbine, troubleshooting, and urban greening business, research related with small wind turbine are underway. The economics and reliability are important parts for the activation of small wind turbine, such as solar energy. In this paper, by analyzing the temperature variations for each location and efficiency of power conversion devices in accordance with short period wind speed changes in simulation test, we reviewed the safety about temperature variations of wind generator and the method of selection of power converter.

Key Words : Small Wind Turbine, Temperature Variation, Power Converter Efficiency

### 1. 서 론

최근 신재생에너지 발전원 사용이 일정 비율 이상 의무화됨에 따라 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 풍력발전설비의 경우 산지내 설치 면적 규제 완화 및 에너지저장장치 연계를 통한 피크시간 이용시 REC 가점 부여 등으로 인하여 활성화가 예상된다. 또한 기존의 풍력 발전시스템은 대형풍력에 의존하였지만 최근 환경 및 소음 문제 해결과 도심 그린화를 목

적으로 소형 풍력발전시스템에 대한 관심이 증가하고 있다[1]. 그러나 근본적으로 풍력발전설비가 활성화 되기 위해서 무엇보다 중요한 점은 경제성과 안정성이다. 경제성을 높이기 위한 방안으로 풍력발전단지의 효율성을 높이기 위해 소용량보다 대용량으로 발전단지를 구축하는 것이 적절하다[2]. 풍력발전시스템은 운전방식에 따라 고정속-고정피치, 고정속-가변피치, 가변속-고정피치, 가변속-가변피치 등으로 구분되며 운전효율적인 측면에서 고정속 시스템보다 가변속 제어 시스템이 유리하다[3]. 전력변환장치 효율과 관련하여 태양광 발전설비의 경우 PCS(Power Conditioning System)에 추종제어와 자동기동/정지기능이 있어 일사량이 80~100W/m<sup>2</sup>이상일 경우 운전을 시작하고 약 70W/m<sup>2</sup>이하일 경우 정지하며, 일사량이

\* Main author : KESCO Electrical Safety Research Institute  
Tel : 063-716-2882, Fax : 063-716-9664  
E-mail : ssong04@kesco.or.kr  
Received : 2015. 2. 25  
Accepted : 2015. 6. 16

200W/m<sup>2</sup>이상일 경우 일정한 변환효율을 갖는다[7]. 또한 태양광 인버터의 경우 정격의 30% 미만에서 효율이 급감한다[8]. 그러나 풍력발전설비의 경우 전력 변환장치의 효율 부분에 관한 연구가 부족한 실정이다. 또한 단시간 풍속변화에 대한 발전기 부분의 열 특성에 관한 안전에 대한 검토가 이루어지지 않았다. 이에 따라 본 논문에서는 모의실험을 통하여 단시간 풍속 변화에 따라 발전기 회전축과 고정자, 전선에서 발생하는 온도변화를 측정하여 안정성을 검토하였다. 또한 전력변환장치의 효율을 측정하여 풍력발전설비 운영자가 전력변환장치를 선정할 때 고려해야 할 사항을 제시하였다.

## 2. 소형풍력발전설비의 구조

IEC 61400-2에 따르면 소형풍력발전(Small wind turbine)은 회전반경이 200m<sup>2</sup>이고 용량이 약 50kW, AC 1000V, DC 1500V이하 사양을 갖는 것으로 일반적으로 용량은 10~100kW 범위이다[5]. 현재 사용되는 소형풍력발전설비의 경우 발전기에서 프로텍션 박스, 전력변환장치를 거쳐서 계통에 전력을 전달하게 된다. 프로텍션 박스의 역할은 과전압 입력시 프로텍션 박스의 내부 저항을 통하여 부하량을 증가시키고 이로 인하여 전압을 감소시키게 된다. 내부 저항을 통한 전압 유지가 어려울 정도의 지속적인 돌풍이 유지된다면 일정시간 후 발전기를 단락시켜 발전기 속도를 제어한다. 전력변환장치에서는 역률제어를 위해 유효전력과 무효전력을 조정한다. 또한 제품에 따라 과전류, 과전압을 보호하고 단독운전발생시에는 유무

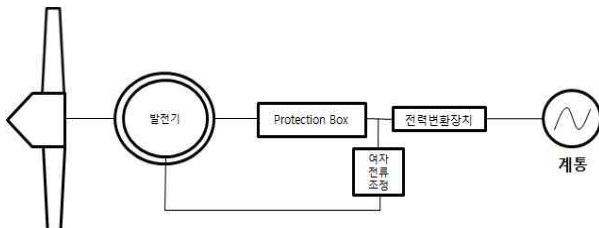


그림 1. 소형풍력발전설비 구조  
Fig. 1. Structure of Small Wind Turbine

효전력 변화에 의해 전압, 주파수 변화를 검출하여 단독운전시 계통과 분리하는 기능을 갖는다[6].

## 3. 실험 방법

풍력발전기의 경우 블레이드의 형상에 따라 입력되는 에너지가 상이하다. 본 논문에서는 풍력발전기 블레이드단 이후에서 입력되는 에너지 변화량에 따른 특성 실험을 위해 그림 2와 같이 모터와 발전기를 연결하여 풍력발전기의 회전속도를 제어하였다. 모터 출력은 22kW이며 풍력발전기는 정격출력 3kW의 동기발전기를 사용하였다. 풍력발전기 회전속도는 전력이 발생하기 시작한 속도인 30RPM부터 300RPM까지 10RPM씩 증속하였다. 회전속도에 따른 안전성을 판단하기 위해 발전을 시작하는 회전속도인 30RPM부터 정격속도의 2배에 가까운 300RPM의 속도로 운전하며 온도를 측정하였다. 측정은 그림 3과 같이 약 10초마다 10RPM씩 상승시켜 회전축과 발전기 내부 고



그림 2. 풍속 변화 모의실험을 위한 M-G 세트  
Fig. 2. M-G Set for Simulation of Wind Velocity Change

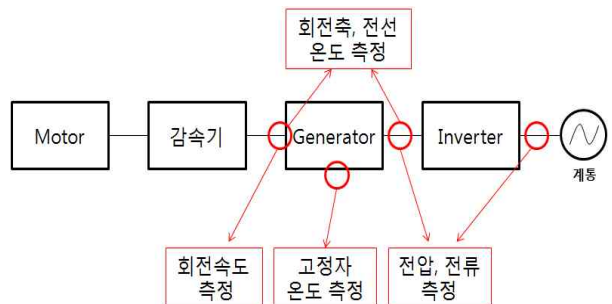


그림 3. 실험 측정 포인트  
Fig. 3. Measurement Point for Experiment

정자권선의 온도 및 전선의 온도를 측정하였다. 고정자의 온도는 온도센서를 고정하여 측정하였으며, 회전축과 전선의 온도 변화는 열화상 카메라를 이용하여 측정하였다. 또한 전력변환장치 효율을 측정하기 위하여 위한 전압, 전류 측정은 발전기 출력단과 인버터 출력단을 각각 측정하였다.

#### 4. 실험 결과

모터를 30RPM에서 300RPM의 회전속도를 변화시킨 후 전압, 전류, 온도 데이터를 측정하였다. 출력곡선을 분석한 결과 발전기의 회전축의 속도 약 150RPM에서 최대출력을 나타냈다. 이를 통하여 회전축의 속도 약 150RPM을 소형풍력발전설비의 일반적인 정격속도 12m/s로 가정하였으며 이에 비례한 값으로 30RPM을 시동풍속인 2.4m/s, 300RPM을 중단풍속인 24m/s로 가정하였다. 풍속 변화를 모의하기 위해 모터의 회전속도를 변화시켜 측정된 전압, 전류, 온도 데이터를 그림 4와 같이 모니터링하였다.

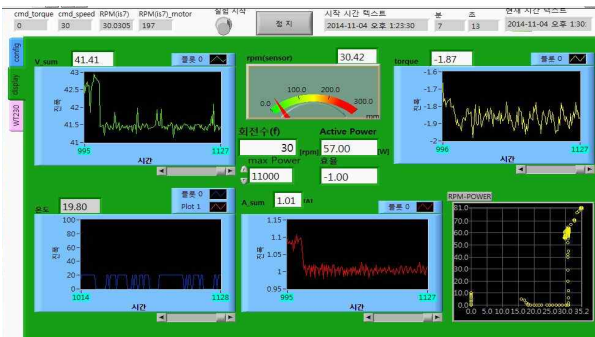


그림 4. 전압, 전류, 온도 데이터 모니터링  
Fig. 4. Voltage, Current, Temperature Data Monitoring

##### 4.1 풍속에 따른 온도변화

측정당시 주변온도는 약 20°C이었으며, 풍속을 시동 풍속부터 중단풍속까지 변화시켜 측정한 결과 회전축의 온도 범위는 그림 5와 같이 최대 21.7°C와 최소 20.6°C로 불과 1.1°C밖에 차이가 나지 않았다. 이를 통해 단시간(약 10초) 속도변화에 의한 발전기 회전축

온도변화는 거의 없었다는 것을 알 수 있었다. 고정자의 온도 역시 변화량이 1°C 미만으로 거의 변동이 없었다. 고정자 온도 측정은 내부 열전대를 이용하였고 회전축의 온도측정은 열화상 카메라를 이용하였기 때문에 다소 오차가 있을 것으로 판단되나 오차를 감안 하더라도 측정된 온도의 변화는 거의 없음을 알 수 있

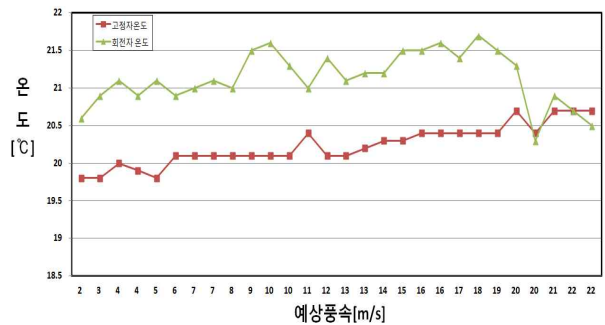


그림 5. 예상풍속에 따른 고정자, 회전축 온도  
Fig. 5. Stator and Rotor Shaft Temperature according to Estimated Wind Speed

표 1. 적외선 열화상카메라로 측정된 예상풍속에 따른 회전축 온도

Table 1. Rotor Shaft Temperature according to Estimated Wind Speed Using Infrared Thermal Imaging Camera

예상 풍속 (m/s)	열화상 측정사진	회전축 온도 (°C)
2.3		20.6
13.4		21.2
22.4		20.5

었다. 표 1은 풍속에 따른 회전축 온도를 열화상 카메라를 이용하여 측정한 값이다.

풍속을 시동풍속부터 중단풍속까지 변화시켜 측정한 결과 발전기로부터 인버터에 연결된 전선의 온도 변화량은 그림 6과 표 2에서 나타난바와 같이 안전에

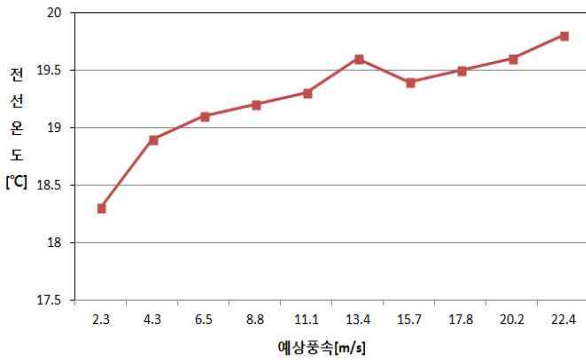


그림 6. 예상풍속에 따른 전선 온도  
Fig. 6. Wire Temperature according to Estimated Wind Speed

표 2. 적외선 열화상카메라로 측정한 예상풍속에 따른 전선 온도  
Table 2. Wire Temperature according to Estimated Wind Speed Using Infrared Thermal Imaging Camera

예상 풍속 (m/s)	열화상 카메라 측정사진	전선 온도 (°C)
2.3		18.3
13.4		19.6
22.4		19.8

영향을 미치지 않을 정도로 작았다. 장시간 운전하는 경우 온도 변화는 있을 것으로 예상되나 모의 실험에서 실시한 단시간(약 10초)의 풍속의 변화에 의한 온도변화는 작은 값을 나타냈다. 그 이유는 발전기 회전축 속도가 증가함에 따라 발전기 출력전압은 그림 7과 같이 상승하지만 온도에 영향을 주는 전류의 크기가 그림 8과 같이 풍속변화에 따라 전력변환장치에 의해 제어되어 일정이상 풍속에서는 오히려 전류량이 감소하기 때문으로 판단된다. 이에 따라 IEC 표준에 따라 절연물의 허용온도는 70°C 이상임을 고려할 때 단시간 풍속변화에 의한 발전기에 연결된 전선의 안전을 위한 특별한 대책을 세울 필요성이 없을 것으로 판단된다.

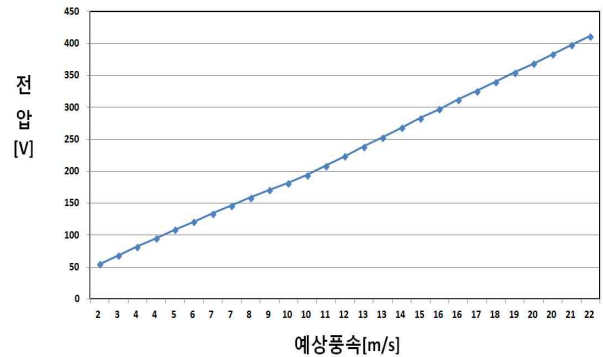


그림 7. 예상풍속에 따른 발전기 출력 전압  
Fig. 7. Generator Output Voltage according to Estimated Wind Velocity

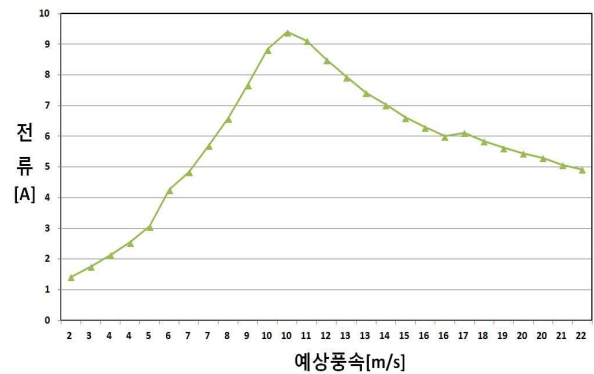


그림 8. 예상풍속에 따른 발전기 출력 전류  
Fig. 8. Generator Output Current according to Estimated Wind Velocity

### 4.2 풍속에 따른 전력변환장치 효율 측정

전력변환장치의 입·출력 전력을 비교한 결과 인버터의 효율은 약 92~93%를 나타냈으며 출력곡선은 그림 9와 같다.

풍력발전기의 출력과 인버터의 출력을 비교해본 결과 그림 10과 같이 인버터의 효율을 알 수 있었다. 그림 10에 나타난 효율곡선을 분석하면 시동풍속의 약 3배인 6.5m/s에서 전력변환장치가 92%이상의 안정적인 효율을 나타내었다. 시동 풍속에서 운영시 전력변환장치의 효율은 약 78.7%를 나타내었으며, 약 5m/s 이상에서 약 90%의 효율을 나타내었다. 전력변환장치의 효율 특성이 제품별로 상이하기 때문에 풍력발전설비 운영자는 전력변환장치를 선정할 때 해당지역의 풍속데이터를 전력변환장치 회사에 제공하여 효율의 안정화가 신속히 이뤄질 수 있는 제품을 선정해야 할 것으로 판단된다.

예상풍속에 따른 풍력발전기의 전압, 전류, 출력 전력, 효율은 그림 11과 같다. 전압은 풍속이 증가할수록 지속적으로 증가하지만 전류는 정격풍속을 기점으로 감소하는 것을 알 수 있었다. 이로 인하여 출력 전력량은 정격풍속까지는 급속하게 증가하지만 정격풍속 이후로 비교적 일정한 수준을 유지하였다. 또한 해당 전력변환장치의 경우 예상풍속 6.5m/s에서 92%이상의 안정된 효율을 나타내었다.

## 5. 결 론

풍속에 따른 특성 실험에서는 약 10초마다 속도를 변화시켜 온도변화를 측정하였으며, 단시간의 온도변화는 회전축과 고정자의 온도 변화가 안전에 영향을 미치지 않을 정도로 적었다. 풍속 변화에 따른 발전기에 연결된 전선의 온도변화도 이는 정격속도가 될 때까지는 전압은 지속적으로 상승하지만 정격속도 초과 시 전류가 감소하기 때문으로 판단된다. 이에 따라 단시간 난류 특성에 따른 풍력발전기 및 전선의 온도 변화에 대한 특별한 대책은 필요하지 않다고 판단된다. 또한 발전기 출력단과 인버터 출력단의 전압, 전류 측정을 통해 인버터 효율을 측정하였다. 이번 모의 실험

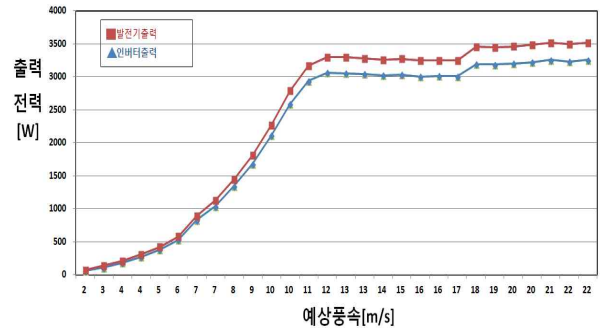


그림 9. 예상풍속에 따른 풍력발전기와 인버터 출력  
Fig. 9. Generator and Inverter Output Power according to Estimated Wind Speed

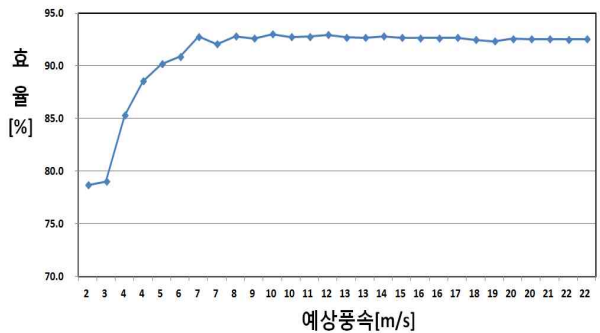


그림 10. 예상풍속에 따른 전력변환장치 효율  
Fig. 10. Power Converter Efficiency according to Estimated Wind Velocity

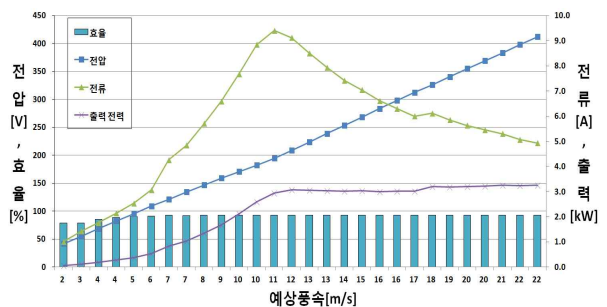


그림 11. 예상풍속에 따른 전압, 전류, 출력, 효율  
Fig. 11. Voltage, Current, Output Power, Efficiency according to Estimated Wind Velocity

에서 사용된 전력변환장치의 경우 약 92~93%의 효율을 나타냈으나 효율이 안정화되기까지 시동풍속의 약 3배의 풍속이 필요했다. 따라서 풍력발전설비 운영자는 풍력발전설비의 전력변환장치 선정시 풍력발전



설비의 효율을 높이기 위하여 해당 사이트의 풍속을 고려하여 전력변환장치를 선정해야 할 것으로 판단된다. 향후 장시간 고풍속의 변화가 많은 난류에 대한 추가적인 발전기 열 특성 및 전선 온도변화에 의한 실험을 진행하여 이에 대한 안전대책을 검토할 필요성이 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2014년도 에너지기술개발사업 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

References

- [1] Jadranka Cace, Emil ter Horst, Katerina Syngellakis, Maite Niel, Patrick Clement, Renate Heppener, Eric Peirano, "Urban wind turbines: Guidelines for small wind turbines in the built environment", Wineur Intelligent Energy Europe, pp. 1-41, 2007.02.
- [2] Joong-Woo Lee, Kwang-Kun Ko, Ki-Kwang Lee, "The Effect of Power Generation Capacity and Wind Speed on the Efficiency of the Korean Wind Farms", Journal of The Korean Operation Research and Management, Vol. 30, No. 2, pp.97-106, 2013.07.
- [3] Byung-Moon Kim, Sung-Ho Kim and Hwa-Chang Song, "Development of Wind Speed Estimator for Wind Turbine Generation System", Journal of Korea Intelligent Information System Society, Vol. 20, No. 5, pp. 710-715, 2010.
- [4] Gi-Won Gang, "Mechanical Safety and Reliability Assessment Technology of Small Wind Turbine", Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 54, No. 7, pp. 34-39, 2014.07.
- [5] Won-Pyo Hong, Technology Trends of Small Wind Turbine for Green City, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 27 No. 1, pp. 57-70, 2013.01.
- [6] Sung-Wook Kang, Kyeong-Hwa Kim, "A Comparative Study on Anti-islanding Detection Scheme of a Grid-connected Inverter for a PMSG-based Wind Power Generation System", Conference of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation, pp. 256-257, 2013.05.
- [7] Jung-Hun So, Young-Seok Jung, Gi-Hwan Kang, Gwon-Jong Yu, Ju-Yeop Choi, Performance Analysis of 15kW Sunshade BIPV System, Conference of KIEE, pp. 1474-1476, 2004.07.
- [8] Tae-Yeon Kim, Dae-seok Rho, Jeong-Hoon So, Hye-Mi Hwang, A Study on Generation Characteristics for BIPV System Configuration, Conference of KIEE, pp. 1106-1107, 2013.07.

◇ 저자소개 ◇



**송영상(宋英上)**

1981년 4월 27일생. 2006년 전남대학교 전기공학과 졸업. 2015년 서울과학기술대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 5월~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 미래기술연구팀 주임연구원.



**한운기(韓雲基)**

1973년 6월 20일생. 1997년 목포대학교 전기공학과 졸업. 2001년 성균관대학교 전기공학과 졸업(석사). 2010년 숭실대학교 전기공학과 졸업(박사). 1998년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 미래기술연구팀 책임연구원.



**정진수(鄭鎭洙)**

1976년 9월 12일생. 2003년 명지대학교 전기공학과 졸업. 2005년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2004년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 미래기술연구팀 선임연구원.



**임현성(林炫成)**

1981년 2월 18일생. 2006년 인천대학교 전기공학과 졸업. 2008년 인천대학교 전기공학과 졸업(석사). 2009년 3월~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 미래기술연구팀 주임연구원.



**조성구(趙成九)**

1983년 1월 3일생. 2009년 서울과학기술대학교 전기공학과 졸업. 2011년 서울과학기술대학원 전기공학과 졸업(석사). 2014년 8월~한국전기안전공사 전기안전연구원 미래기술연구팀 주임.



**전태현(田太賢)**

1967년 1월 31일생. 1989년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1993년 Minnesota 대학교 대학원 졸업(석사). 1997년 Minnesota 대학교 졸업(박사). 1997년 Motorola 연구원. 1998년 Texas Instruments 연구원. 2002년 한국전자통신연구원(ETRI) 선임연구원. 2005년~현재 서울과학기술대학교 전기정보공학과 교수.