

50kW 풍력발전기의 출력 성능에 관한 연구

김형길*, 공정식**, 권기진***, 오진훈****, 문채주*****
 (주)셀텍*, 영진전문대학**, 영남이공대학교***, 구미대학교****, 국립목포대학교*****

A study of Power Performance for 50kW Wind Turbine

Hyoung-Gil Kim*, Jeong-Sik Kong**, Ki-Jin Kwon***, Jin-Hun Oh****, Chae-Joo Moon*****
 SeoITech Co., Ltd*, YeungJin College**, Yeungnam College***, Gumi University****, Mokpo National University*****

Abstract - Wind turbines have an enormous potential for decentralized electricity generation. In recent years, there has been an increasing worldwide interest in small/medium wind systems. This paper presents the results of power performance testing conducted on a 50 kW turbine located in Yeonggwang test-bed. The turbine system is a pitch, active yaw, variable speed, upwind, three blade with a direct drive PMSG.

This thesis covers the operation of variable speed wind turbines with pitch-yaw control. The system considered is controlled to generate maximum energy while minimizing loads. The data include power, wind speed, and direction from meteorological towers, and nacelle anemometer readings and output from turbine. The analysis concentrates on the effect of the load on the power-wind speed curve of the turbine.

1. 서 론

최근 국내·외에서 진행중인 신재생에너지 프로젝트는 대부분 용·복합 관련 사업이며, 소규모 분산전원, 도서 지역의 전력 고도화 및 에너지 자립성에 대한 투자가 집중되고 있다. kW/원 단가에 경쟁력이 없었던, 50~250[kW] 풍력터빈 제품들이 시장 수요에 의해서 다시 주목을 받고 있으며 각국의 관련 기업에서 경쟁적으로 개발 및 투자가 진행 중이다. 대부분의 도서지역은 바람자원이 우수한 특성이 있어 풍력 발전이 가장 적합한 에너지원으로 분석되고 있으며, 설치지역의 경우 대형 풍력발전기 설치가 불가능하여 중소형 풍력발전기로 단지를 조성하여 전력을 공급 하는 것이 적합하다. 또한 국가적인 재생에너지 보급정책의 하나로 지역 에너지 사업이나 신재생에너지 시범사업 등의 추진이 지속 되어 풍력설비를 활용한 마이크로 그리드 단위의 보급 배경이 되고 있다. 소규모 전력망인 마이크로그리드는 기존 배전망과 풍력, 태양광, 에너지 저장장치(ESS)등을 연계하여 운용할 경우 효율성과 경제성을 확보할 수 있어 향후 많은 개발이 이루어질 것으로 예상된다. 풍력은 가변 풍속에서 안정적인 운전을 하기 위한 정격풍속 이상에서 출력을 제한, 유지하기 위해서 블레이드 스톨(Stall) 또는 피치(Pitch)방식을 적용한다 [1]. 본 논문에서는 피치제어 방식의 50[kW] 수평축 풍력발전기를 영광 실증부지에 설치하여 출력성능 해석을 수행하며, 정격 풍속이상에서의 피치제어에 의한 정격출력 특성에 대해서 실증자료를 분석하였다.

2. 본 론

2.1 풍력발전기

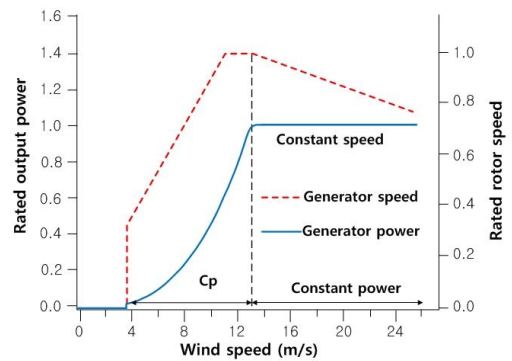
바람을 이용하는 풍력발전은 풍속에 의해 발생된 풍력에너지를 1차적으로 풍력터빈의 회전날개에 의해 기계적 에너지로 변환하고, 이 변환된 기계적 에너지를 이용하여 발전기의 회전자를 구동시켜 최종적으로 전기에너지를 출력시킨다. 이 경우 일정속도의 바람이 풍차의 회전면에 도달 후 속도가 0이 되고, 후단으로 나가는 바람이 없다면 풍력에너지는 100% 사용되어질 수 있다. 하지만, 이는 실질적으로 불가능하며, 일부는 다른 에너지로 변환되고, 나머지는 후단으로 빠져나가는데, 이때 풍속의 감소분의 에너지가 전력등과 같은 다른 에너지로 변환된다. 풍력발전 시스템에서 단위 면적당 공기 역학적 출력과 이로부터 회전자속에 얻어지는 이상적인 기계적 출력은 다음과 같다.

$$\frac{P}{A} = 0.59 \frac{1}{2} \rho v^3 \quad [kW/m^2] \quad (1)$$

$$\frac{P}{A} = C_p(\lambda) \frac{1}{2} \rho v^3 \quad [kW/m^2] \quad (2)$$

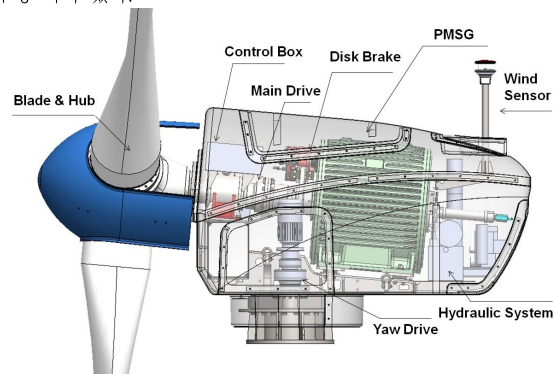
위의 식에서 v 는 풍속[m/s], A 는 로터의 투영면적 [m^2], 공기밀도 ρ 는

($1.25 \pm 0.04 \text{ kg/m}^3$)의 실용값을 쓰는 것이 일반적이며, 출력계수 $C_p(\lambda)$ 는 날개 단면의 형상에 의해 결정되며 그 최대값이 Betz 상수인 0.59를 넘지 못하며 주속비(λ)의 함수로 나타난다. 그림 1은 피치 제어에 의한 풍속대비 로터 회전수 및 출력제어 곡선을 나타낸다. 중형이상의 풍력터빈에서는 일정속도 이상의 풍속이 되면 블레이드(Blade)의 Stall 또는 Pitch 제어에 의해 출력을 제한하여 발전기를 보호하고 있다.



〈그림 1〉 풍력 터빈의 출력제어

본 논문의 풍력발전기는 수평축 3 블레이드, Upwind 형식의 풍력발전 시스템으로 IEC III에 대한 극한 강도 및 설계수명을 만족하도록 설계되었다. 풍속 9[m/s]에서 정격출력이며, 발전을 시작하는 시동풍속은 2.5[m/s], 강풍시 발전을 정지시키는 중단풍속은 20[m/s]이다. 정격풍속 이상에서 출력을 제어하는 방식은 블레이드 피치각도를 조절하는 유압식 피치제어 방식이며, 직구동 방식의 PMSG를 사용하고 계통 연계형 풍력터빈이다. 그림 2에서 풍력 시스템 구조는 기계장치부, 전기장치부 및 제어 장치부로 구성되어 있다. 기계장치부는 블레이드, 주축, 요, 브레이크 장치 및 타워, 너셀로 구성되어 있으면 전기장치부는 PMSG, PCS, Grid 연계형으로 구성되며, 요-피치 제어기 및 모니터링 시스템으로 구성되어 있다.



〈그림 2〉 풍력터빈의 내부 구조

2.2 유압식 피치 제어기

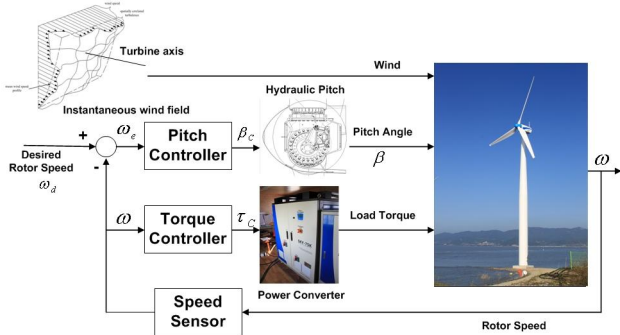
풍력발전 제어에서 직접 제어할 수 있는 변수들은 회전 날개의 피치각(β), 발전기의 회전수 및 토크이다. 블레이드 피치각도 제어방법은 유압식 실린더를 사용한 통합 구동방식이며, 3 블레이드 피치 각도가 동시에 제어된다[2]. 피치각을 제어하면, 풍력발전 에너지 회수 효율, C_p 의 값이 변동되며 풍력터빈의 출력 파워가 정격출력으로 유지되도록 한다.

그림 3의 풍력터빈 출력 제어시스템 간단한 구조에서 피치제어기와 토크제어기 두 가지로 구분 할 수 있다. 일반적으로 토크제어는 정격풍속 이전 구간에서 사용한다. Max C_p 를 추종 하는 방법은 $T_a = k_{op} \Omega_r^2$ 의 식처럼 k_{op} 와 Ω_r^2 를 곱한 값을 명령신호로 내보내면 된다. 여기서 k_{op} 는 다음 식으로 표현된다. R 은 로터의 반지름[m], Ω_r 은 로터회전수[r/s], v 는 풍속[m/s]로 λ 는 무차원 계수이다. 일정한 λ 값을 유지하기 위해서는 풍속이 일정하게 증가한다면 로터 회전수도 일정하게 증가해야 한다. 이 때 피치각은 Fine pitch로 유지되어야 한다. 정격풍속 이상에서는 풍속이 증가할수록 작동점에 맞는 피치각을 사용함으로써 발전기 토크는 정격 토크로 유지되며, 로터의 회전속도는 피치제어에 의해서 정격으로 제어된다. 이때 C_p 값은 계속 감소하게 된다.

$$T_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 \left(\frac{C_{Pmax}}{\lambda_0} \right) v^2 = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 \left(\frac{C_{Pmax}}{\lambda_0} \right) \left(\frac{R \Omega_r}{\lambda_0} \right)^2 = k_{op} \Omega_r^2 \quad (3)$$

$$k_{op} = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \left(\frac{C_{Pmax}}{\lambda_0^3} \right) \quad (4)$$

k_{op} 는 풍력터빈마다 고유한 값을 갖는 상수로 최적 계인(gain)이라고 한다. 정격이전 구간에서 바람의 힘에 의해 로터 회전수가 변화되면 위의 식과 같이 토크 값을 추종하면 된다. 정격풍속 이상의 구간에서는 피치제어기가 작동하며, 현재 로터 회전수와 정격 회전수의 오차에 의해 피치 명령 값을 계산하여 피치동작을 함으로써 정격 회전수를 유지할 수 있도록 도와준다. 이 때 토크제어기에서는 일정한 정격토크를 낼 수 있도록 명령 신호를 보낸다. 일반적으로 피치제어기는 PI 제어기가 사용되고, 주파수 분석을 통한 계인 값을 찾는 것이 중요하다[2-3].



〈그림 3〉 풍력 터빈의 출력제어

2.3 실증 및 출력성능

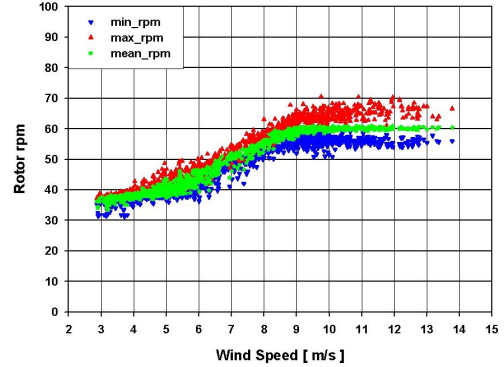
풍력발전기 시제품을 전남-영광 테스트 베드에 설치 한 후 IEC 61400-12 기준에 정한 절차에 따라 풍력발전시스템 출력성능 시험을 수행 하였다. 실증 장소는 연평균 풍속 6[m/s] 이상이며, 공용 수면위에 터빈을 설치하였으며, 계측 타워(Met mast)의 위치는 주풍 방향으로 풍력 터빈 앞쪽에 설치하였다. 표1과 같이 50[kW] 풍력발전기는 수평축 발전기로 로터의 직경 19.8[m]이고, 타워의 높이는 24[m]이다.

〈표 1〉 풍력발전기 사양

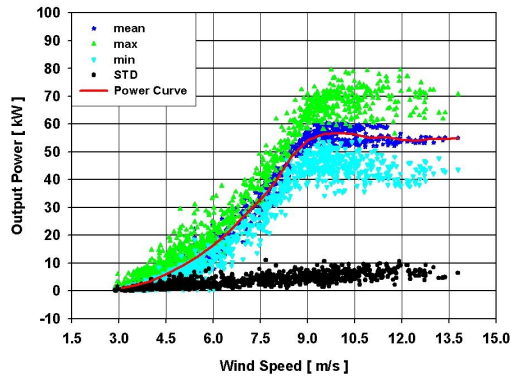
Output power	50 kW
Rated rotor speed	60 rpm
IEC Turbine class	III
Rotor diameter	19.8 m
Cut in	2.5 m/s
Cut out	20 m/s
Power regulation	Variable and Pitch
Yawing	Active electric motor
Tower & Height	Tubular-24m
Grid Voltage, Frequency	3 phase 380Vac, 60Hz
Design standard	IEC61400-2,23

풍력터빈의 출력성능(Power Performance)은 터빈의 특성을 나타내는 여러 지표 중에 가장 중요한 요소라 할 수 있다. 여러 분야의 엔지니어링 기술이 복합적으로 적용된 해석 및 시뮬레이션으로 시작하여, 요소부품 조립을 통해서 시제품이 출력성능에 관한 설계 목표에 만족하는 지를 평가하는 것은 매우 중요하다. 성능시험은 풍력터빈의 에너지생산량,

전력의 품질, 신뢰성, 소음, 경제성까지도 분석할 수 있다. 정상적인 풍력터빈 작동 조건에서 수집된 자료는 초당 저장되며 1분 단위로 분리하여, 평균값, 표준 편차값, 최대-최소값으로 0.5[m/s]의 단위로 풍속 간(wind speed bin)을 작성하여 분석 하였다. 그림 4는 풍력터빈 출력성능 시험에서 풍속에 대한 로터 회전수를 나타내며, 정격이하의 풍속에서 로터 회전수는 가변적이며, 정격이상의 풍속에서 블레이드의 피치제어에 의해서 정격속도 60[rpm]으로 운전된다. 난류에 의한 정격출력 대비 오차는 10[%] 이내로 측정되었다. 그림 5는 풍력터빈의 파워 커브(Power curve)를 나타내며, 터빈출력 분석 결과, 정격풍속 이상에서 피치 제어에 의한 55[kW] 출력곡선을 얻을 수 있었다.



〈그림 4〉 피치 제어에 의한 로터 회전수 제어



〈그림 5〉 풍력 터빈의 출력곡선

3. 결 론

본 논문에서는 직구동방식의 PMSG, 정격풍속 이상에서 피치 방식의 50[kW]급 풍력발전기 시제품을 제작하여, 실증단계에 설치를 하였다. 출력 성능시험을 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 정격 풍속 이내에서 피치는 고정이며, PCS에 의한 최대출력 추종제어에 따라서 터빈은 가변 풍속시 최적의 C_p 로 동작된다.
- 2) 정격 풍속 이상에서 피치는 PI 제어기 의한 속도제어에 따라서 정격 60[rpm]으로 운전되며, 난류에 의한 정격 출력대비 오차는 10[%]이내로 측정 되었다.
- 3) 풍력터빈 출력성능 시험에서 평균풍속 9[m/s]에서 출력은 55[kW]로 분석되었다.

향후 연구 내용으로는 피치제어 최적화를 통해서 출력향상과 기계하중 저감에 대한 제어알고리즘에 대한 연구를 수행할 예정이다.

[참 고 문 헌]

[1] Bossanyi, E., Wright, A., and Fleming, P., "Further Progress with Field Testing of Individual Pitch Control." EWEC, Warsaw, 2010
 [2] Bianchi, F.D. Battista, H.D. "Wind Turbine Control Systems, Principles, Modeling and Gain Scheduling Design." Springer, 2007
 [3] Muljadi, E.; Butterfield C.P.; Buhl, Jr., M. L. "Effect of Turbulence on Power Generation for Variable Speed Wind Turbines," Presented at the ASME Wind Energy Symposium, Houston, TX, Jan. 6-9, 1997.

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 광역경제권 선도산업 및 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 연구 결과입니다.