

750kW gearless형 풍력발전 시스템용 모의시험 장치의 개발

권 세진,* 손 윤규,* 서 재학,* 이 월우,* 장 성덕,* 오 종석,* 황진수,** 박기우,*** 권오정***
포항공속기연구소*, 유니슨,** 플라스포***

Development of a Simulator for 750 kW Gearless Wind Turbine

S. J. Kwon,** Y. G. Son,* J. H. Seo,* W. W. Lee,* S. D. Jang,* J. S. Oh,* J. S. Hwang,** G. W. Park,*** O. J. Kwon*** PAL/POSTECH,* UNISON,** PLASPO***

Abstract - 풍력을 이용한 풍력발전기의 전력변환 시스템을 개발하기 위해서는 바람특성을 정확히 분석하고 이를 대처할 수 있는 모의시험 장치가 필수적이다. 모의 시험 장치는 풍향, 풍속 등의 인자들을 입력받아 회전 블레이드의 토오르크를 전동기가 대신해서 발전기에 공급하게 된다. 본 논문에서는 풍력발전 모의시험 장치를 이용하여 현재 개발 중인 750kW gearless형 풍력발전 시스템의 인버터 특성과 고효율의 전력변환 설계를 위해 시험용 지그에서 시험한 결과를 보이고자 한다.

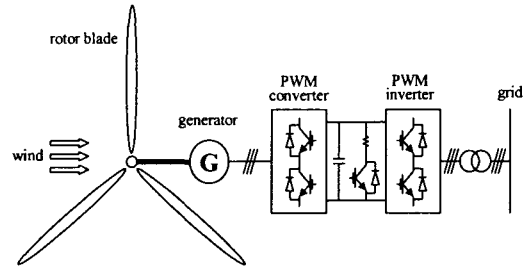


그림 1. 가변속 풍력발전 시스템의 기본 구성도

1. 서 론

우리나라는 97%이상의 에너지원을 해외에서 수입하고 있다. 풍력에너지의 활용은 원유 수입 절감을 통한 단순한 외화 절약의 차원을 넘어 화석연료의 고갈에 따른 신재생 에너지원 확보, 비산유국으로서 에너지 자립을 위해 반드시 필요하며, 신재생 에너지 산업은 국제적 기후변화 협약에 대응하는 가장 확실한 해결책의 하나로 볼 수 있다. 이러한 관점에서 풍력발전기는 가장 효과적이고 효율적인 에너지원이다. 풍력발전기는 대형화 추세에 있으며 발전과 제어를 위하여서는 적절한 시험이 필수적이다. 그러나 풍력발전기의 특성상 회전자 블레이드를 사용하여 토오르크를 공급하는 것은 넓은 공간과 비용의 제약이 따른다. 그러므로 750 kW gearless형 풍력발전기의 영구자석형 동기발전기에 대한 토오르크 회전자 블레이드 대응하는 직류 전동기를 사용하여 스케일 다운(100:1)의 7.5 kW급 시뮬레이터를 설계, 제작하였다. 또한, 750kW 동기식 영구자석형 발전기를 모델로 하는 20 kW발전기를 제작하였으며, 인버터에 대한 시험용 지그를 제작하여 750kW gearless형 풍력발전기에 대한 모의시험을 실시하였다.

회전자 블레이드에 입력되는 바람 에너지의 비율인 출력 계수(power coefficient), C_p 는 식(1)의 주속비에 대한 함수로 나타난다. 출력계수는 이론상 최대값이 0.59로 실제로 가능한 최대값은 이 값보다 작다[1].
입력되는 바람에 대한 풍력발전기의 회전자 블레이드에서 변환되는 에너지는 다음과 같다[1][3].

$$P_{wind} = 0.5 \rho A v_{wind}^3 C_p(v_{wind}, \omega_{blade}, \theta_{pitch}, \phi_{yaw}) \quad (2)$$

ρ 는 공기의 질량으로 약 1.25 kg/m³, A는 회전자 블레이드의 단면적이다. 또한, C_p 는 풍속(v_{wind})과 회전자 블레이드의 각속도(ω_{blade}), 피치각(θ_{pitch}) 및 허브의 요각(ϕ_{yaw})의 함수이다. 이때의 회전자 블레이드의 토오르크는

$$T = \frac{P_{wind}}{\omega} = 0.5 \rho A v_{wind}^3 \frac{C_p}{\omega} [Nm] \quad (3)$$

으로 나타낼 수 있다. 따라서 회전자 블레이드의 토오르크는 풍속과 회전자 블레이드의 회전 속도에 의해서 결정된다.

2. 가변속 풍력발전기의 시뮬레이터 시스템

2.1. 가변속 풍력발전기의 특성

풍력발전 시스템의 기본 구성은 그림 1과 같이 나타낼 수 있으며, 바람으로부터 받아들이는 에너지는 다음 식들과 같이 표현할 수 있다.

회전자 블레이드의 주속비(tip speed ratio)인 λ 는 풍속과 회전자 블레이드 끝의 회전 속도의 비율로 나타낸다.

$$\lambda = \frac{\text{블레이드 끝의 속도}}{\text{풍속}} = \frac{\omega_{blade} \cdot R_{blade}}{v_{wind}} \quad (4)$$

ω_{blade} 는 회전자 블레이드의 회전 각속도, R_{blade} 는 회전자 블레이드의 반지름이며, v_{wind} 는 풍속을 나타낸다.

2.2. 시뮬레이터의 설계 및 제작

현재 설계 및 제작 중인 750 kW gearless형 풍력발전기용 인버터 시스템의 개발 단계에서 인버터 제어기의 성능 평가와 제어 알고리즘의 개발 및 검증을 위하여 실제의 본 제품과 같은 회전자 블레이드와 대용량의 발전기가 필요로 한다. 그러나 이러한 시스템을 구축하기 위해서는 많은 비용과 실험 공간이 요구되므로 현실적으로 불가능하다. 그러므로 본제품의 회전자 블레이드와 발전기를 묘사할 수 있는 시뮬레이터가 구축되어야 하며, 바람에 의한 풍력발전 효과를 그대로 구현할 수 있어야 한다. 풍력발전기 시험용 시뮬레이터를 설계할 때 본 제품의 풍력발전기와 동일한 특성을 가지도록 설계하여야 한다. 본 제품의 풍력발전기와 시뮬레이터의 동일한 특성을 가지도록 주요 설계 조건을 살펴보면 다음과 같다.

- 인버터 입력에 대한 동일한 발전기의 전기적 주파수 f
- 시스템 동특성에 대한 동일한 관성계수 H
- 주속비 λ 에 대한 동일한 출력계수 C_o
- 시뮬레이터의 출력에 대한 축척 계수 s
- 주어진 값 : 발전기의 극수 p , 기어비 g
- 가변 값 : 풍속 v , 회전자 블레이드의 반지름 R

위의 같은 설계 조건들에 대한 식을 나타내면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\bullet \text{ 발전기의 전기적 주파수, } f: f = \frac{\omega}{60} \cdot \frac{p}{2}$$

$$\bullet \text{ 관성 계수, } H: H = \frac{J\omega^2}{P}$$

$$\bullet \text{ 주속비, } \lambda: \lambda = \frac{\omega R}{v}$$

$$\bullet \text{ 축척계수, } s: s = \frac{P_o}{P_s}$$

여기서, J 는 관성 모멘트, P_o 는 실제 시스템, P_s 는 시뮬레이터를 나타낸다. 위의 각 식에 대하여 본 제품의 풍력발전기와 시뮬레이터의 관계를 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\omega_s P_o = \omega_s P_s \quad (4)$$

$$J_o \omega_s^2 / P_o = J_s \omega_s^2 / P_s \quad (5)$$

$$\omega_s R_o / v_o = \omega_s R_s / v_s \quad (6)$$

이와 같은 조건으로 본 제품의 풍력발전기에 대한 시뮬레이터의 설계 변수는 다음 표 1에 나타내었다.

표 1. 시뮬레이터의 설계 변수

| Parameters | KBP-750D | Generator in simulator | Driving motor in simulator |
|----------------------------------|----------|------------------------|----------------------------|
| 축척계수, s | - | 100 | - |
| 기어비, n_g | - | - | 28 |
| 발전기 극수, n_p | 84 | 32 | - |
| 정격 용량, P (kW) | 850 | 8.5 | - |
| 정격 속도, ω (rpm) | 25 | 65.6 | - |
| 정격 토크, T (kN-m) | 325 | 1.24 | 44.3 |
| 관성 모멘트, J (kg-m ²) | 686,090 | 996 | - |
| 블레이드 반지름, R (m) | 25 | 5.58 | - |
| 정격 풍속, v (m/s) | 11.8 | 6.91 | - |
| 관성시상수, H (s) | 5.53 | 5.53 | - |

풍력발전기의 회전자 블레이드가 가지는 기계적 관성을 동일하게 하기 위하여 직류 전동기의 축에 관성 계수가 같은 플라이휠(fly wheel)을 설치하여 실제의 풍력발전기 블레이드가 회전하는 효과를 나타나게 하였다. 그림 2는 풍력발전 모의시험을 위하여 제작된 시뮬레이터를 보여주고 있다.

시뮬레이터에서는 회전자 블레이드에 의해 발생하는 토크를 직류전동기에 의해 발생시키며, 풍속을 입력받은 풍속계의 신호에 의해 연산되어지는 값에 의해 직류전동기의 제어 값이 결정되어 진다[2]. 시뮬레이터에 사용되는 발전기는 영구자석 동기발전기의 시제품으로 제작된 20kW 이며, 출력이 50%인 10kW 기준용량으로 하였다. 시뮬레이터에서 직류전동기는 속도 모드와 토크 모드로 구동되어진다. 토크 모드로 구동될 때 인버터는 직류 전동기가 공급하는 토크와 발전기의 부하 토크 제어가 균형을 유지하도록 제어되어야 한다.

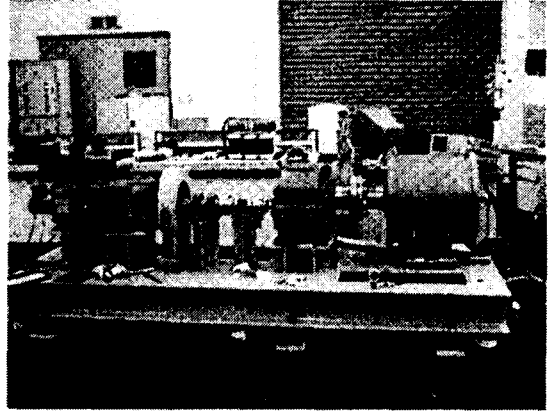


그림 2. 제작된 풍력발전기용 시뮬레이터

전력을 변환하는 인버터는 발전기 단자와 연결된 3상모듈을 통해서 발전된 전압을 직류로 변환하여 에너지 저장캐패시터에 직류전원으로 충전을 한다. 저장의 3상교류전원을 직류전원으로 변환하는 컨버터와 직류전원을 PWM(Pulse Width Modulation)방식을 이용하여 상주파수의 전원으로 변환하는 인버터 부분으로 구분된다.

3. 시뮬레이터의 실험

회전자 블레이드의 토크는 바람의 힘에 의해 결정되며 풍속에 따른 토크 계산 프로그램에 의하여 직류 전동기의 제어값으로 입력된다. 풍속으로 변환된 값은 직류전동기를 기동하는 기준값으로 입력되고 직류전동기의 출력 토크를 측정하기 위하여 전동기 축에 토크 메타를 설치하여 비교하였다.

풍력발전기의 정상적인 운전시에는 회전 블레이드의 피치와 발전기 토크는 각각 피치 제어기 및 토크 제어기에 의해 제어된다. 풍속에 따라 부하변동이 발생할 경우 토크는 일정하게 제어되도록 프로그램되어 있고 정의된 토크-속도 곡선에 따라 제어된다. 이 토크-속도 곡선은 회전자 블레이드의 최적 주속비에 따라 운전이 되는 것으로 결정되었다. 풍속에 따라 회전자의 최저 속도와 최대속도를 제한하고 이 범위를 내에서만 제어가 되도록 한다. 회전자의 기저속도에 대한 토크는 PI 제어기에 의해 제어된다. PI 제어기는 회전자 속도 차를 제어 입력으로 사용한다. 750 kW gearless형 풍력발전기는 그림 3과 같이 풍속에 의한 회전자의 속도별로 3단계로 정의된다.

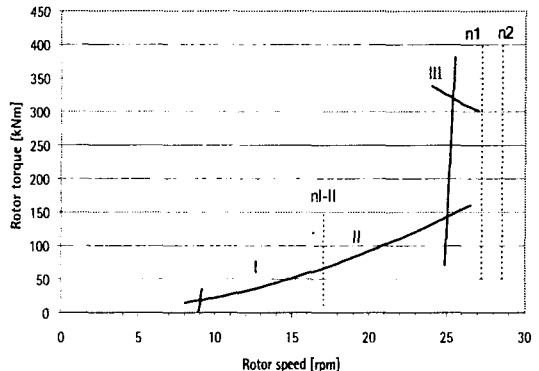


그림 3. 풍속에 따른 토크 제어범위

저풍속 영역인 제어 영역 I은 회전자 속도 9 rpm이상으로 요구되는 제어기의 회전자 토오크는 이득 토오크보다 높으며, 토오크는 이 값에 제한된다. 회전자의 속도가 17 rpm 이상에 되면, 제어기는 제어 영역 I에서 제어 영역 II로 바뀌게 된다. 중간풍속 영역인 제어 영역 II의 회전자 정격 속도는 25 rpm까지 이다. 이 영역에서의 요구되는 제어기의 회전자 토오크는 이득 토오크보다 낮으며, 토오크는 이 값에 제한된다. 만약 회전자의 속도가 17 rpm 보다 낮아지게 되면, 제어기는 제어 영역 II에서 제어 영역 I로 바뀌게 된다. 회전자의 속도가 정격속도 이상이 되면 제어기는 제어 영역 II에서 제어 영역 III로 변화하며, 동시에 출력도 정격 출력으로 접근하게 된다. 고풍속 영역인 제어 영역 III은 회전자 정격 속도가 25 rpm이며, 최대풍속은 25 rpm을 초과하는 것으로 정의된다. 제어 영역 III에서의 발전기 토오크는 일정한 출력을 갖도록 되어있다. 발전기의 최대 토오크는 정격 토오크의 약 110%로 제한한다. 이 풍속의 영역에서는 회전자 속도를 25 rpm으로 유지하도록 피치제어 등을 통해서 일정한 속도를 유지하도록 한다.

그림 4는 인버터측에서 측정된 출력토오크 출력파형이다. 여기서는 직류전동기를 0 - 1700 rpm까지 가변으로 하여 그때 인버터측에 출력되는 토오크 값을 측정 한 것이다. 각 제어영역에 대하여 인버터측 토오크의 출력값이 기준값을 잘 추적하고 있음을 볼 수 있다.

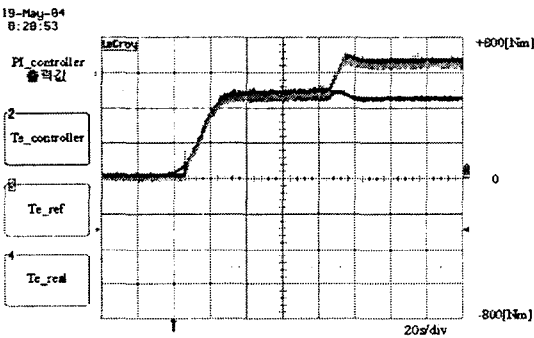


그림 4. 풍속에 따른 출력토오크 출력파형

그림 5는 풍속에 따른 발전기의 토오크를 측정 한 값들이다. 풍속을 각 제어 영역 별로 증가시키면서 제어기의 동작을 나타내고 있다. 그림 4의 기준값을 잘 추적하고 있음을 볼 수 있으며, 제어 영역 III 이상의 풍속에서는 회전자 블레이드의 피치제어에 의하여 토오크가 일정하게 유지되도록 하지만, 본 실험에서는 피치 제어가 제어 되었다.

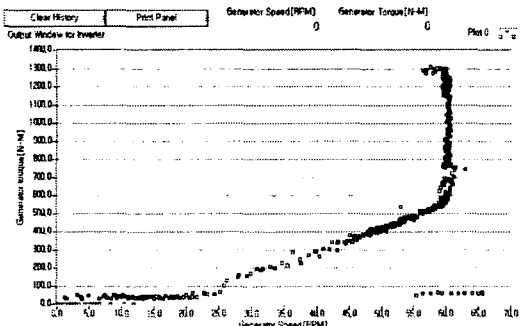


그림 5. 풍속에 따른 발전기 토오크

4. 결 론

가변속 풍력발전기의 토오크 제어는 입력되어지는 풍속에 대한 제어값을 기준으로 일정한 값을 갖도록 제어하는 것이 무엇보다도 중요하다. 본 논문에서는 대형 풍력 설비를 같은 조건으로 크기를 작게하여 비율적인 값을 갖도록 실험장치를 제작하고 실제상황과 같은 조건을 설정하여 실험을 하였다. 실험장치에서 얻어진 결과들은 본 제품에 반영이 되며, 프로그램의 수정이나 기타 이상 현상에 대한 동작현상들을 모의시험을 통해서 반영해 나갈 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] J.F.Manwell, etc., "Wind Energy Explained - Theory, Design and Application", John Wiley and Sons, Ltd, 2002
- [2] 정병창, 송승호, 노도환, 김동용, 김영민, 임종연, "풍력터빈 모의 실험을 위한 가변 토오크 입력형 전동기-발전기 제어 시스템 제작 및 실험", 2002대한전기학회 추계 학술대회 논문지, pp346-348, 2001.
- [3] 김동연, 정진화, 황진수, 류지운, 김두훈, "풍력발전에 사용되는 소형 20 kW급 영구자석, 직접구동형 발전기의 개발", 2003대한전기학회 하계학술대회 논문지, pp1398-1400, 2003