

750-kW 풍력발전기 개발을 위한 모의시험 장치의 시험

권 세진¹⁾, 손 윤규²⁾, 서재학³⁾, 이 율우⁴⁾, 장 성덕⁵⁾, 오 종석⁶⁾, 황 진수⁷⁾, 강 신일⁸⁾,
권 오정⁹⁾, 정 진화¹⁰⁾, 한 경섭¹¹⁾, 전 증환¹²⁾

Test Results of Simulator for 750-kW Gearless Wind Turbine

Seijin Kwon, Yoongyu Son, Jaehak Suh, Woulw Lee, Sungduk Jang, Jongseok Oh,
Chinwha Chung, Chunghwan Chun, Kyungseop Han, Jinsu Whang, Sinil Kang, Ojung Kwon

Key words : Simulator(모의시험장치), Gearless(무기어), Windpower Inverter(풍력인버터), Power Conversion(전력변환)

Abstract : 풍력을 이용한 풍력발전기의 전력변환 시스템을 개발하기 위해서는 바람의 특성을 정확히 분석하고 이를 대처할 수 있는 모의시험 장치인 시뮬레이터가 필수적이다. 모의시험 장치는 풍향 풍속 등의 인자들을 입력받아 회전자 블레이드의 토오크를 전동기가 대신해서 발전기에 공급하게 된다. 본 논문에서는 풍력발전 모의시험 장치를 이용하여 750-kW gearless형 풍력발전기의 축소모델인 20-kW 모델 발전기와 고효율의 전력변환 장치 설계 및 인버터 특성을 위한 시험용 지그에서의 시험한 결과를 보고자 한다.

Nomenclature

- v_{wind} : wind speed, m/s
- R_{blade} : radius of the blade, m
- ω_{wind} : angular speed of blade, rad/s
- Θ_{pitch} : pitch angle
- Φ_{yaw} : yaw angle

subscript

- MTTP : maximum power point Tracking
- TRS : tip speed ratio
- PWM : pulse width modulation

풍력발전기는 대형화 추세에 있으며 개발단계에서 풍력발전기의 발전과 제어를 위해 적절한 시험이 필수적이다. 그러나 풍력발전기의 특성상 회전자 블레이드를 사용하여 시험한다는 것은 공간과 비용의 제약이 따른다. 그러므로 750 kW gearless형 풍력발전기의 영구자석형 동기발전기에 대한 토오크를 회전자 블레이드 대응하는 직류 전동기를 사용하여 스케일 다운 (100:1)하여 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.

1. 서론

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. 현재의

2. 가변속 풍력발전기

풍력발전기의 기본구성은 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 풍력발전기의 가변속 운전은 발전기와 전기적 운전특성을 고려한 최대전력추정(MTTP, Maximum Power Point Tracking) 제어가 요구된다. 풍력발전기의 운전은 출력계수(Power coefficient, C_p)와 주속비(TSR, Tip Speed Ratio)에 의해 그 특성이 결정되어 진다. 일반적

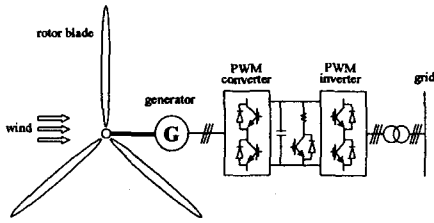


Fig. 1 가변속 풍력발전기

으로 주속비의 계산은 그림 2에서 나타낸 바와 같이 회전자 동력계수에 대한 주속비에 의해 산출된다[1].

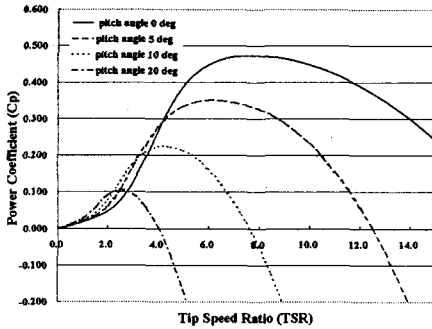


Fig. 2 KBP-750D의 회전자 특성

회전자 블레이드의 주속비 λ 는 풍속에 대하여 블레이드 끝의 회전 속도의 비율을 나타낸다.

$$\lambda = \frac{\text{블레이드 끝의 속도}}{\text{풍속}} = \frac{\omega_{blade} \times R_{blade}}{v_{wind}}$$

여기서, ω_{blade} 는 블레이드의 회전 각속도, R_{blade} 는 블레이드의 반지름이며, v_{wind} 는 풍속을 의미한다. 따라서 풍력발전기 회전자 블레이드의 주속비는 풍속에 따라 변화한다. 블레이드에 의해 나타나는 회전자의 에너지 비율인 출력계수, C_p 는 아래 식의 주속비에 대한 함수로 나타낸다.

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

ρ 는 공기의 질량으로 약 1.23 kg/m^3 , A 는 회전자 블레이드의 단면적이다. 또한, C_p 는 풍속 (v_{wind})과 회전자 블레이드의 각속도 (ω_{wind}), 피치각 (θ_{pitch}) 및 허브의 요각 (ϕ_{yaw})의 함수이다. 만약 최대 값의 C_p 로 시스템이 운전된다면 풍력발전기의 출력은 최대가 될 것이다. 그러나 출력계수는 이론상 최대값이 0.59로 실제로 가능한 최대값은 이 값보다 작다. 풍속에 의한 회전자 블레이드의 토크 T 는 다

음과 같이 나타난다.

$$T = \frac{P_{wind}}{\omega} = 0.5 \rho A v_{wind}^3 \frac{C_p}{\lambda v/R} = 0.5 \rho A v_{wind}^3 R C_T [N \cdot m]$$

3. 모의시험 장치의 설계

750 kW gearless형 풍력발전기용 인버터 시스템의 개발 단계에서 인버터 제어기의 성능 평가와 제어 알고리즘의 개발 및 검증용을 위하여 실제의 본 제품과 같은 회전자 블레이드와 대용량의 발전기가 필요로 한다. 그러나 이러한 시스템을 구축하기 위해서는 많은 비용과 실험 공간이 요구되므로 현실적으로 불가능하다. 그러므로 본 제품의 인버터 설계 단계에서 회전자 블레이드와 발전기를 묘사할 수 있는 모의시험 장치를 설계 및 제작을 하였다. 모의시험장치는 바람에 의한 풍력발전 효과를 그대로 구현할 수 있어야 한다. 풍력발전기 시험용 모의시험 장치의 설계시 본 제품의 풍력발전기와 동일한 특성을 가지도록 설계하여야 한다. 본 제품의 풍력발전기와 모의시험 장치가 동일한 특성을 가지도록 주요 설계 조건을 살펴보면 다음과 같다[4].

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

위와 같은 설계 요구조건들에 대한 식을 나타내면 다음과 같이 표현할 수 있다.

- 발전기의 전기적 주파수, f : $f = \frac{\omega}{60} \cdot \frac{p}{2}$
- 관성 계수, H : $H = \frac{J\omega^2}{P}$
- 주속비, λ : $\lambda = \frac{\omega R}{v}$
- 축척계수, s : $s = \frac{P_o}{P_s}$

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

$$\begin{aligned} \omega_o P_o &= \omega_s P_s \\ J_o \omega_o^2 / P_o &= J_s \omega_s^2 / P_s \\ \omega_o R_o / v_o &= \omega_s R_s / v_s \\ \omega_o^3 R_o^5 &= \omega_s^3 R_s^5 \end{aligned}$$

이와 같은 조건으로 본 제품의 풍력발전기에 대한 모의시험 장치의 설계 변수는 다음 표 1에 나타내었다[2][3].

Table 1 모의시험 장치의 설계 변수

Parameters	KBP-750D	Generator in simulator	Driving motor in simulator
축척계수, s	-	100	-
기어비, ng	-	-	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	-

모의시험 장치에서는 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 나타내게 하였다. 그림 3은 풍력발전기의 모의시험을 위하여 제작된 모의시험 장치를 보여주고 있다.

풍력발전기 회전자 블레이드에 의해 발생하는 토크를 모의시험 장치에서는 직류전동기에 의해 발생시키며, 풍속을 입력받은 풍속계의 신호에 의해 연산되어지는 값에 의해 직류전동기의 제어 값이 결정되어 진다. 모의시험 장치의 발전기는 영구자석 동기발전기의 시제품으로 제작된 20kW 이며, 출력이 50%인 10kW 기준용량으로 하였다[5]. 모의시험 장치에서 직류전동기는 속도 모드와 토크 모드로 구동되어진다. 토크 모드로 구동될 때 인버터는 직류 전동기가 공급하는 토크와 발전기의 부하 토크 제어가 균형을 유지하도록 제어되어야 한다.

전력변환 장치는 발전기 단자전압을 에너지 저장용 콘덴서에 직류로 충전하고 인버터의 동작에 의해 DC/AC로 변환한다. 인버터-컨버터는 에너지 저장용 콘덴서, 인버터-컨버터 변환모듈, 제동저항 및 냉각장치로 구성되어 있다. 가 변속

발전기의 최대출력은 정격속도에서 토크 제어와 피치제어를 통하여 최대전력이 되도록 제어한다. DC/AC 변환모듈은 계통으로 고품질의 전력공급과 원만한 계통연계를 수행한다.

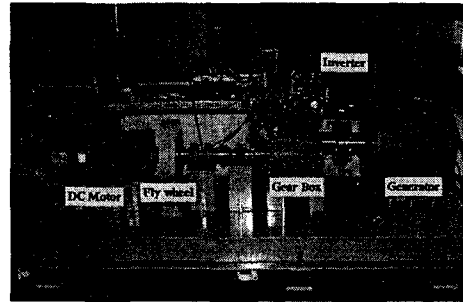


Fig. 3 제작된 모의시험 장치

3. 모의시험 장치의 시험

회전자 블레이드의 토크는 바람의 힘에 의해 결정되며 풍속에 따른 토크 계산 프로그램에 의하여 직류 전동기의 제어값으로 입력된다. 풍속으로 변환된 값은 직류전동기를 구동하는 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 발생되었을 경우 토크는 일정하게 제어되도록 프로그램 되어있고 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 이루어지도록 한다. 회전자의 기저속도에 대한 토크는 PI 제어기에 의해 제어된다. PI 제어기는 회전자 속도 차를 제어 입력으로 사용한다. 회전자의 정격속도 이상에서 PI 제어기는 일정 출력제어를 수행한다.

750 kW Gearless 풍력발전기의 제어기의 동작은 3 가지 영역으로 구분된다. 이들 서로 다른 3 가지 영역 I, II 및 III를 그림 4에 보였다. 제어 영역 I 과 II는 불완전한 부하 조건의 제어 영역이며, 제어영역 III은 완전한 부하 조건인 정격 출력에서의 제어 영역을 나타낸다.

제어 영역 I(저풍속 영역)에서의 회전자 속도는 9 ~ 17 rpm이다. 만약 요구되는 제어기의 회전자 토크가 최적 이득 토크보다 높다면, 토크는 이 값에 제한된다. 회전자의 속도가 17 rpm 이상이 되면, 제어기는 제어 영역 I에서 제어 영

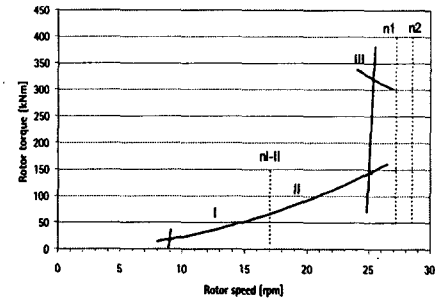


Fig. 4 풍속에 따른 토오크 제어범위

역 II(중간풍속 영역)로 바뀌게 된다. 중간풍속 영역인 제어 영역 II의 회전자 정격 속도는 25 rpm이다. 제어 영역 II에서는 최적 이득 토오크가 제어기의 토오크 보다 낮다면 이 값에 제한된다. 만약 회전자의 속도가 17 rpm이하로 떨어진다면 제어기는 제어영역 II에서 제어영역 I으로 바뀌게 된다. 회전자의 속도가 정격속도 이상이 되면 제어기는 제어 영역 II에서 제어 영역 III(정격풍속 영역)로 동작하며, 동시에 출력도 정격 출력으로 접근하게 된다. 제어 영역 III의 회전자 정격 속도가 25 rpm이며, 최대풍속은 25 m/s를 초과하는 것으로 정의된다. 제어 영역 III에서의 발전기 토오크는 일정한 출력을 갖도록 되어 있다. 발전기의 최대 토오크는 정격 토오크의 약 110%로 제한된다. 제어 영역 III에서는 회전자 속도를 25 rpm으로 유지하도록 피치제어를 통해서 일정한 속도를 유지하도록 한다. 피치각이 0°가 되면 제어기는 제어영역 III에서 제어영역 II로 바뀌게 된다.

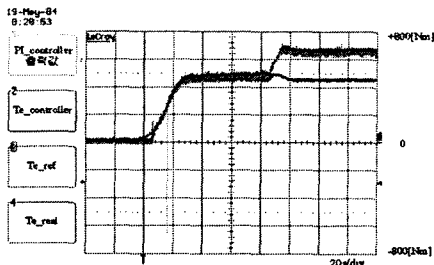


Fig. 5 회전자 속도변화에 대한 인버터의 출력토오크

그림 5는 인버터에서 측정된 출력 토오크의 파형이다. 제어영역 I과 II에서 출력 토오크는 그림 4에 정의된 최적 토오크값으로 잘 따라가고 있음을 볼 수 있다. 제어영역 III에서 부하 토오크가 최적 토오크 보다 크다는 것을 잘 보여준다.

그림 6은 회전자 속도변화에 대한 발전기의 출력 토오크를 나타내었다. 26 rpm 이하에서 측정된 토오크는 베어링과 기어박스의 마찰에 따른

토오크이다. 또한, 시스템의 관성으로 인하여 작은 오브슈터 및 히스테이시스값이 측정되었다. 전체적으로 정의된 제어 패턴을 따라 제어가 잘 이루어지며 그림 4와 매우 유사하게 제어가 됨을 알 수 있다.

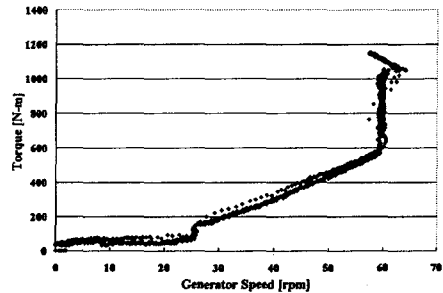


Fig. 6 측정된 토오크-발전기 속도 곡선

그림 7은 풍속에 따라 측정된 각종 변수이다. 2.5 m/s의 시동(cut-in) 풍속이상에서 발전기 회전자의 속도가 증가된다. 4.2 m/s 풍속이상에서 인버터가 정의된 부하에 따라 동작한다.

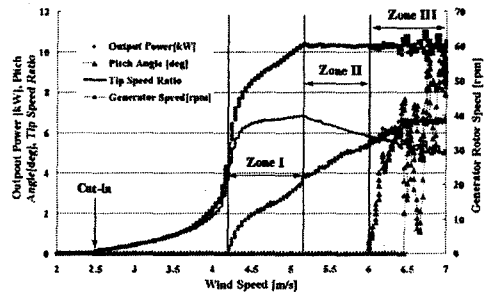


Fig. 7 측정된 각 변수 곡선

풍속 5.2 m/s 이상에서 회전자의 속도는 62 rpm을 유지하며 주속비는 감소하기 시작한다. 피치제어기는 6 m/s 이상의 풍속에서 동작되어 6.4 kW의 출력으로 제한되는 것을 알 수 있다.

그림 8은 측정된 값에 따라 계산된 토오크 계수와 주속비에 따른 피치각을 나타내었다. 그림의 오른쪽에 나타난 결과는 MPPT 조건에 의한 최적 운전점을 나타낸다. 이는 풍속 5.2 m/s 이상에서 토오크 계수 곡선을 따라 운전점이 바뀐다. 토오크 계수는 풍속이 증가함에 따라 출력을 제한하기 위하여 감소하게 된다.

4. 결론

가변속 풍력발전기의 토오크 제어기는 최적의 출력과 최대의 출력 발전을 위하여 정의된 값에 따라 운전되는 것이 중요하다. 또한, 모든 풍속 영역에서의 안전하고 신뢰성있는 운전은 적절한 제어와 안전을 위한 연동장치에 의해 이루어진다. 모의시험 장치는 실제 풍력발전기와 같은 대

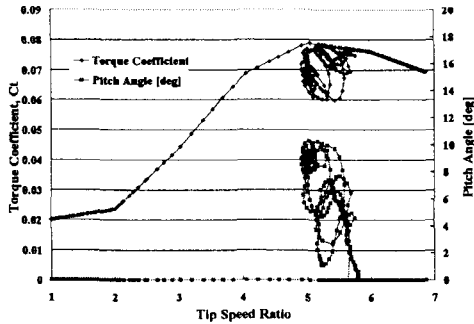


Fig. 8 측정된 토오크계수-피치각 곡선

형 풍력발전기를 분석하는데 필수적이다. 본 논문에서는 모의시험 장치를 통한 풍력 발전기의 설계 개념과 시험의 결과들을 보였다. 모의시험을 통하여 제어기의 제어방법등 750kW gearless 풍력발전기(KBP-750D) 개발에 요구되는 특성을 분석할 수 있었으며, 이러한 결과들은 본 제품 개발에 반영하였다.

References

- [1] J.F.Manwell, etc., "Wind Energy Explained - Theory, Design and Application", John Wiley and Sons. Ltd, 2002.
- [2] S.D.Jang, etc., "Development of an Inverter System for Korean 750-kW Gearless PM Synchronous Wind Turbine", WVEC2004 & Renewable Energy Exhibition, pp203-208, 2004.
- [3] S.J. Kwon, S.D.Jang, Y.G.Son, J.H.Seo, W.W.Lee, J.S.Oh, C.W.Chung, C.H.Chum "Development of simulator for 750-kW gearless wind turbine" International Conference on Electrical and Systems, Proceedings (ICEMS2004), Hotel Ramada, Jeju Island, Korea, October 31- November 3, 2004.
- [4] 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.
- [5] 김동연, 정진화, 황진수, 류지운, 김두훈, "풍력발전에 사용되는 소형 20 kW급 영구자석, 직접구동형 발전기의 개발", 2003대한전기학회 하계학술대회 논문지, pp1398-1400, 2003.