

10kW 풍력발전기의 동작특성 분석을 위한 토크 시뮬레이터 개발

Development of Torque simulator for the performance analysis of the 10kW wind turbine system

김세윤* · 김성호**† · 이종희*** · 문진영****

Se-Yoon Kim, Sung-Ho Kim[†], Jong-Hee Lee, and Jin-Young Moon

*군산대학교 전자정보공학부

*School of Electronics and Information Engineering, Kunsan National University

**군산대학교 제어로봇공학과

**† Department of Control and Robotics Engineering, Kunsan National University

(주)세스, *(주)미래테크

SESS, *MIRAETECH, Company

요 약

10kW 급의 소형 풍력 발전 시스템은 언덕이나 공원, 도시와 같은 협소한 지역에 유연하게 설치될 수 있다는 장점으로 인해 신재생에너지 분야에서 지속적인 연구와 개발이 이루어지고 있다. 이러한 풍력발전 시스템의 설계시에는 풍속변화에 따른 다양한 형태의 전력 제어장치의 체계적인 성능 분석이 요구된다. 그러나 실물 크기의 풍력발전기에 개발된 전력 제어장치의 직접 적용은 어려운 실정이며 따라서 실내에서 풍속의 변화에 따른 블레이드의 공력토크를 모사할 수 있는 토크 시뮬레이터를 사용하여 설계된 전력 제어장치의 성능을 분석하는 것이 바람직하다. 이에 본 연구에서는 3상 토크제어용 인버터, 3상 유도전동기, 벨트 감속기 및 PMSG로 구성되는 10kW급 풍력발전 토크 시뮬레이터를 개발하고자 한다.

키워드 : 풍력 발전기, 전력 제어장치, 토크 시뮬레이터, PMSG

Abstract

10kW wind turbine is widely studied in the field of renewable energy for the merits of easy installation to the confined area such as hill, park and urban areas. The performance of various electrical devices such as converter and inverter in the wind turbine system should be systematically analyzed for various wind speeds. However, it is impossible to apply these devices directly to practical wind turbine system for the safety of wind turbine system. Therefore, it is required to develop torque simulator which can generate corresponding torque according to its wind speed. In this work, 10kW torque simulator which consists of three phase torque control inverter, 3 phase induction motor and PMSG(Permanent Magnet Synchronous Generator) is developed.

Key Words : Wind Turbine System, Electrical Devices, Torque Simulator, PMSG

1. 서 론

접수일자: 2014년 9월 14일

심사(수정)일자: 2014년 9월 28일

게재확정일자: 2014년 12월 2일

† Corresponding author

본 논문은 본 학회 2014년도 추계 학술대회에서 선정된 우수논문입니다.

본 논문은 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20133030020930)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

최근 10kW급의 출력을 갖는 수직형 또는 수평형 소형 풍력 발전시스템은 설치상의 유연성으로 인해 공원, 도시에 적극적으로 도입되고 있다[1]. 10kW급 풍력발전기에는 기계적인 요소인 블레이드 뿐 만 아니라 발전기에서 생산되는 전력을 처리하기 위한 다양한 형태의 전력 제어장치가 포함된다[2-3]. 수직형 풍력 발전시스템과는 달리 수평형 풍력 발전 시스템의 경우 이러한 전력 제어 장치의 체계적인 설계를 위해서는 실제 블레이드가 장착된 풍력발전기에 직접 적용하는 것이 바람직하나 현실적으로는 안전성 등과 같은 문제로 인해 직접 적용이 어려운 실정이다. 이에 본 연구에서는 10kW급 풍력발전기의 공력 특성을 모사하여 체계적인 전력 변환장치의 성능 평가를 수행할 수 있게 하는 토크

시뮬레이터를 개발하고자 한다.

2. 10kW급 소형 풍력발전시스템을 위한 토크 시뮬레이터

본 연구에서 개발된 10kW급 풍력발전용 토크 시뮬레이터의 전체 구성은 그림 1과 같다. 그림으로부터 토크 시뮬레이터는 첫째, 컴퓨터상에서 풍속에 따라 블레이드로부터의 공력토크를 발생시키는 풍속-토크 발생부, 둘째, 풍속-토크발생부로부터의 토크를 입력으로 받아 들어 3상 유도전동기에 결정된 토크를 공급하기 위한 토크제어용 인버터 셋째, 실제 토크를 생성하기 위한 3상 유도전동기 및 12kW PMSG(Permanent Magnet Synchronous Generator)로 구성되어 있으며 마지막으로 특성 곡선 실험 및 풍력 시스템의 다양한 실험을 진행하기 위해 Boost 컨버터 및 1kW(13 Ω)급 전기히터 니크롬선 부하로 구성 되어 있다. 또한 본 연구에서 제작된 토크 시뮬레이터는 Osiris사의 10kW급 풍력발전기(Osiris 10)를 모사하도록 설계되었으며 실제 블레이드의 회전속도와 발전기의 회전속도를 일치시키기 위해 3.8:1의 감속 벨트를 사용하였다.

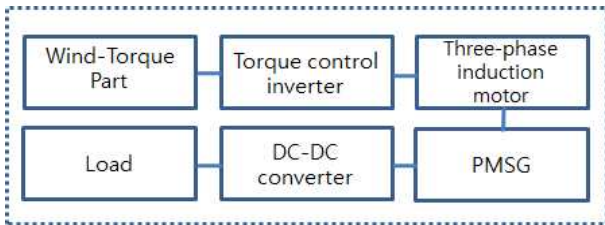


그림 1. 10kW급 풍력발전용 토크 시뮬레이터의 전체 구성

Fig. 1. Overall configuration of 10kW torque simulator

토크 시뮬레이터 각 부분에 대한 설명은 다음과 같다.

2.1 풍속-토크 발생부

풍속-토크 발생부는 풍속에 따라 블레이드로부터의 공력토크를 발생시키기는 기능을 한다. 본 연구에서는 Osiris사의 10kW급 풍력발전기(Osiris 10)에 사용된 블레이드를 모사하기 위해 Osiris사에서 공개한 풍속-파워 곡선 데이터와 12kW PMSG 발전기의 RPM-Power 곡선을 이용하여 블레이드 특성곡선($C_p-\lambda$)를 취득하였으며 이를 나타내면 그림 2와 같다.

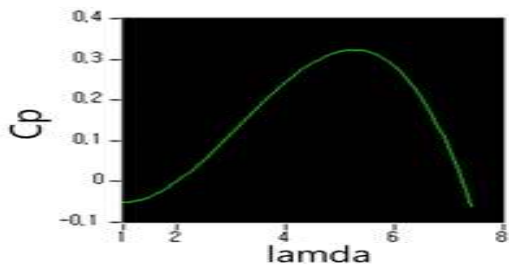


그림 2. $C_p-\lambda$ 특성 곡선

Fig. 2. $C_p-\lambda$ characteristic curve

풍력에너지로부터 터빈에 의해 흡수되는 에너지는 식(1)과 같은 비선형 함수에 의해 표현이 가능하다.

$$P_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_{wind}^3 C_p(\lambda, \beta) [W] \quad (1)$$

여기서 R 은 회전자의 반경[m], ρ 는 공기의 밀도로 약 $1.25 [Kg/m^3]$ 이다. 상기 식에서 전력계수 C_p 란 풍속 V_{wind} 의 바람이 갖고 있는 에너지 중에서 블레이드가 받아들이는 에너지의 비율을 의미하며, λ 는 풍속에 대한 블레이드의 회전속도 비인 주속비(tip-speed ratio)로 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{V_{wind}} \quad (2)$$

상기 수식을 이용하여 가상의 블레이드에 대한 $C_p-\lambda$ 특성곡선을 이용한다면 그림 3과 같은 풍속의 변화에 따른 전력-회전속도 곡선을 구하는 것이 가능하게 된다.

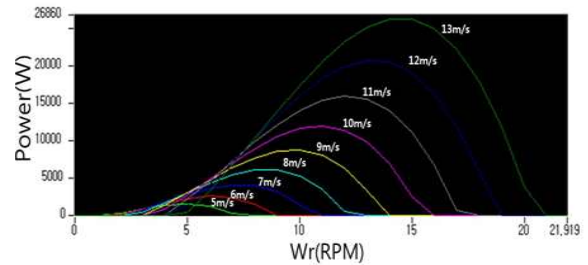


그림 3. 블레이드 특성곡선으로부터 계산된 전력-회전속도 그래프

Fig. 3. Generator power curve calculated from $C_p-\lambda$ characteristic curve

풍속변화에 따른 블레이드의 토크-회전속도 곡선은 토크 시뮬레이터 동작에 매우 중요한 특성곡선으로 전력을 회전속도[rad/sec]로 나누어 구할 수 있으며 이를 나타내면 그림 4와 같다. 그림 4로부터 풍속이 변화할 때 해당되는 회전속도에 대한 토크를 구한 후 이를 3상 유도전동기의 토크 제어를 위한 인버터에 출력한다.

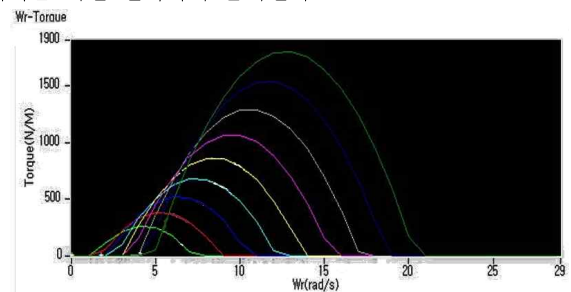


그림 4. 블레이드 특성곡선으로부터 계산된 토크-회전속도 그래프

Fig. 4. Torque-speed curve calculated from $C_p-\lambda$ characteristic curve

그림 3의 풍속 변화에 따른 발전량 곡선으로부터 풍속의 변화에 따른 발전량 곡선을 구하면 그림 5와 같다. 그림 5에서는 정격풍속 이상의 풍속에 대해 피치제어기 구동되어 전력이 정격 출력으로 유지됨을 알 수 있다.

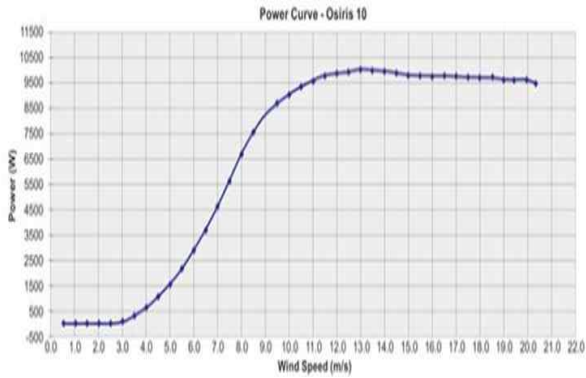



그림 5. Osiris 10 발전기의 발전 특성 곡선
Fig. 5. Wind power characteristic curve of Osiris 10 Generator

2.2 토크 제어용 인버터

전질에서 고찰한 풍속의 변화에 대한 토크-회전속도 곡선으로부터 현재의 풍속 및 발전기의 회전수를 안다면 블레이드로부터 생성되는 토크를 구하는 것이 가능하게 되며 이렇게 구해진 토크는 토크 제어용 인버터에 출력된다.

토크 제어용 인버터는 토크-회전수 특성곡선으로부터 얻어진 토크값을 받아 들어 3상 유도전동기를 구동하게 된다. 본 연구에서 사용된 3상 유도 전동기용 인버터는 ABB사의 ACS800으로 0~20mA의 전류를 변화시켜 토크를 제어할 수 있다.

표 1. ABB사의 모터드라이브
Table 1. Motor Drive for ABB


 <p>ACS800</p>	Input	Unit	Value
	Volt	V	3~380..500 (480) V
	Current	A	29 (27) A
	Freq	Hz	48..63 Hz
	Output	단위	없음
	Volt	V	3~0..U Input V
	Current	A	31 (29) A
	Freq.	Hz	0..300 Hz

2.3 3상 유도 전동기

토크 제어용 인버터에 의해 구동되는 3상 유도전동기는 토크 시뮬레이터의 공간상의 제약으로 인해 유도전동기와 발전기를 직결하지 않고 벨트로 연결하여 구동시켰다. 벨트에 의한 감속비는 3.8:1이며 따라서 토크 제어용 인버터에 인가되는 토크는 1/3.8로 스케일링 되어 사용되었다.

본 연구에서는 10kW급 풍력발전기를 가정하였기 때문에 발전기의 정격 전력보다 높은 15kW급 유도전동기를 사용하였으며 정격 회전속도는 880[rpm]이다.


표 2. 15kW급 3상 유도전동기의 사양
Table 2. Specification of 15kW 3 phase Induction Motor

 <p>3phase Induction Motor</p>	output(kW)	15 kW
	Efficiency(%)	84 %
	Power Factor(%)	65 %
	Voltage(V)	380V, 3p
	Current(no-load/Activation)(A)	27.4/254.8
	Rated speed(r/m)	880 r/m
	Torque(rating/Activation) (kg·m)	16.6/220
	Torque(MAX)(%)	250
	Moment of Inertia	1.9287

2.4 PMSG(Permanent Magnet Synchronous Generator)

풍속에 따른 토크-회전속도 곡선, 토크 제어용 인버터 및 3상 유도전동기는 실제 블레이드로부터 발생하는 토크를 모사하는 기능을 수행한다. 따라서 3상 유도전동기에서 발생하는 토크는 실제 블레이드와 연결되는 PMSG를 회전시켜 기계적인 에너지를 전기적인 에너지로 변화시키는 기능을 수행한다. 본 연구에서는 12kW급 PMSG를 사용하였으며 3상 AC를 출력하며 정격 회전속도는 135[rpm]이다.

표 3. 12kW급 PMSG의 사양
Table 3. Specification of 12kW PMSG

 <p>12kW급 PMSG</p>	Rated Output Power(kW)	12 kW
	Rated Rotation Speed(RPM)	135
	Rectified DC Current at Rated Output(A)	25
	Required Torque at Rated Power(NM)	947
	Phase Resistance(Ohms)	0.9
	Generator configuration	3 Phase star connected AC output

본 연구에서 사용된 PMSG의 회전속도대 발전량 그래프를 나타내면 그림 6과 같다.

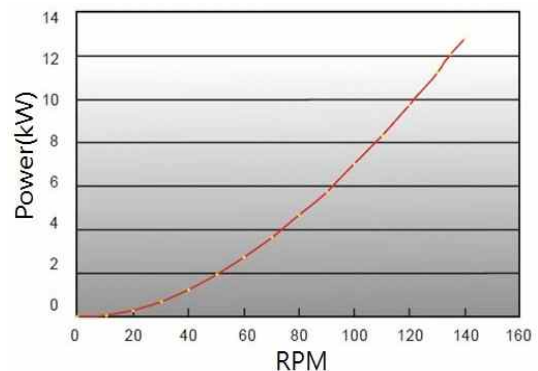


그림 6. 12kW급 PMSG의 RPM-Power 곡선
Fig. 6. RPM-Power characteristic curve of 12kW PMSG

3상 유도 전동기와 PMSG가 벨트로 연결된 시스템은 그림 7과 같다.



그림 7. 3상 유도전동기와 PMSG의 연결 사진
 Fig. 7. Inter connection figure of 3 phase induction motor and PMSG

2.5 DC-DC 부스트 컨버터

3상 유도전동기로부터 발생된 회전 토크는 벨트로 연결된 PMSG를 회전시키며 PMSG는 회전속도에 따라 주파수 및 진폭이 변화하는 3상 출력을 발생하게 된다. 본 토크 시뮬레이터에서는 대부분의 소형풍력발전기에서 채택되고 있는 3상 브릿지 다이오드를 사용하여 PMSG로부터의 교류를 직류로 변화하였으며 직류로 변환된 전압을 DC-DC 부스트 컨버터를 이용하여 승압시켜 부하에 연결되도록 하였다.

본 연구에서 사용한 부스트 컨버터의 기본 구성은 그림 8과 같으며 해당 파라미터는 표 4와 같다.

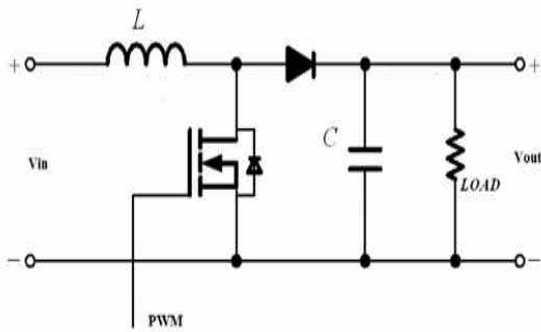


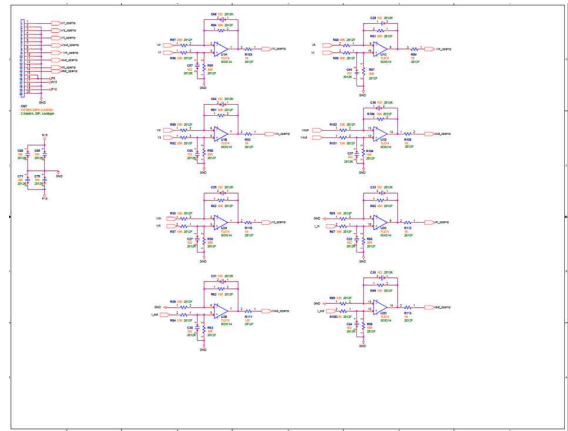
그림 8. DC-DC 부스트 컨버터
 Fig. 8. DC-DC Boost Converter

표 4. 부스트 컨버터에 사용된 소자

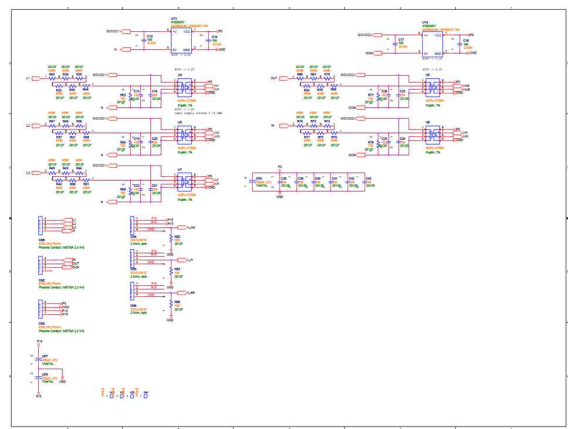
Table 4. Electrical parameter used in boost converter

Circuit devices	Value
L	2mH, 30A
C	400V,2700uF

본 연구에서는 10kW의 부스트 컨버터를 제작하였으며 회로도 및 실제 제작된 시스템을 나타내면 그림 9 및 10과 같다.



(a)



(b)

그림 9. DC-DC 부스트 컨버터의 회로도

(a) 드라이버부 (b) 센서부

Fig. 9. Circuit diagram of DC-DC Boost Converter
 (a) Driver (b) Sensor

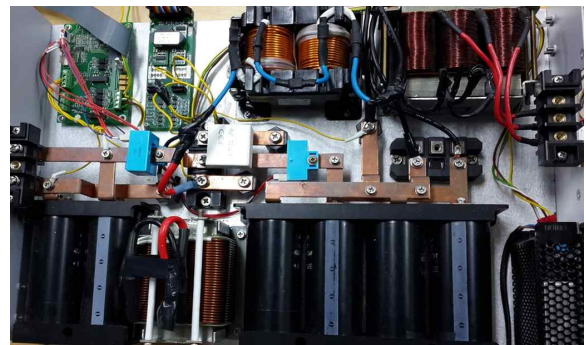


그림 10. 개발된 DC-DC Boost 컨버터

Fig 10. Developed DC-DC Boost Converter


2.6 DC-DC 부스트 컨버터 제어용 PWM 발생기

그림 10과 같은 부스트 컨버터는 스위칭 소자에 인가되는 PWM 신호의 듀티비(D)를 조절함으로써 식(3)과 같이 승압이 가능하게 된다.

$$V_{OUT} = V_{IN} / (1 - D) \tag{3}$$

본 연구에서는 DC-DC 부스트 컨버터의 전압 조절을 위한 PWM 신호의 발생을 위해 Arduino Mega 2560을 사용하였으며 사용된 Arduino Mega 2560의 사양은 표 5와 같다.

표 5. Arduino MEGA 사양
Table 5. Specification of Arduino MEGA

	Microcontroller	ATmega2560
	Operating Voltage	5V
	Input Voltage	7-12V
	Input Voltage(limits)	6-20V
	Digital I/O Pins	54 (of which 14 provide PWM output)
	Analog Input Pins	16
	Flash Memory	256 KB
	SRAM	8 KB
	EEPROM	4 KB
	Clock Speed	16 MHz

Arduino Mega 2560의 경우 기본으로 제공되는 PWM 포트의 스위칭 주파수가 490Hz로 낮기 때문에 타이머 레지스터 값을 변경하여 31KHz의 스위칭 주파수를 갖도록 변경하였다.

2.7 부하

PMSG에서 발생하는 전력은 부하에서 소비되어야 하며 이를 위해 본 연구에서는 그림 11과 같은 히터를 부하로 사용하였다. 구성된 부하는 1kW(13Ω)급 저항 20개로 구성되었으며 다양한 실험을 위해 선택적인 부하의 조절이 가능하도록 설계하였다. 직렬로 연결되었을 경우 최대 저항은 R=260Ω이다.



그림 11. 1kW(13Ω)급 저항
Fig 11. 1kW(13Ω) Resistance

2.8 토크 시뮬레이터의 동작 메커니즘

본 연구에서 개발된 토크 시뮬레이터는 사용자의 설정에 따라 다양한 풍속을 발생시킬 수 있으며 설정된

풍속하에서 PMSG의 회전속도에 따라 가상의 블레이드에 대한 토크가 자동적으로 계산되고 구해진 토크는 3상 유도전동기 토크 제어기로 출력된다. 토크 시뮬레이터의 동작 플로우 차트를 나타내면 그림 12와 같다.

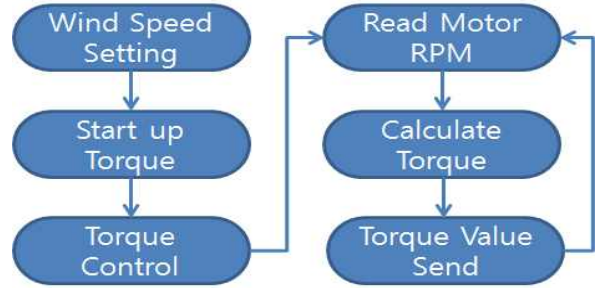


그림 12. 토크시뮬레이터의 동작 플로우차트
Fig. 12. Flow chart of torque simulator

상기와 같이 동작되는 토크 시뮬레이터의 효율적인 운영을 가능케 하기 위해 본 연구에서는 그림 13과 같은 토크 시뮬레이터 제어 및 모니터링 프로그램을 C#으로 작성하였으며 화면의 구성과 기능을 나타내면 그림 13 및 표 6과 같다.

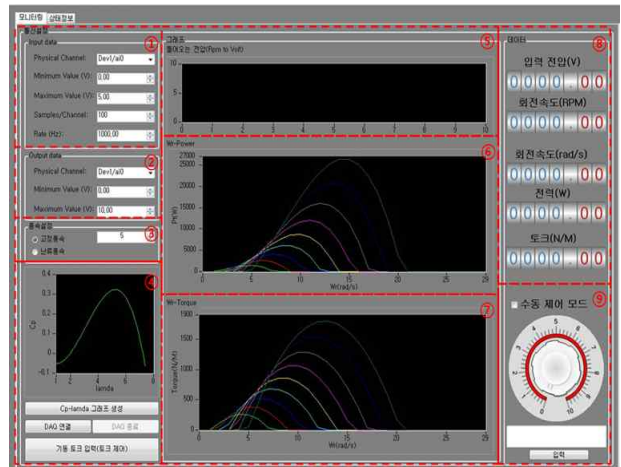


그림 13. 토크 시뮬레이터 제어 및 모니터링 프로그램
Fig 13. Torque simulator control and monitoring program

표 6. 제어 및 모니터링 프로그램 구성 및 기능
Table 6. Control and monitoring of configuration and function

①	Input Motor Speed Setting
②	Send Torque
③	Wind Speed Setting
④	Blade Characteristic Curve
⑤	Motor Speed Graph
⑥	Motor Speed - Power Graph
⑦	Motor Speed - Torque Graph
⑧	Input-Output Data Print
⑨	Manual Torque Control

3. 실험

본 연구에서 제작된 토크 시뮬레이터의 유용성 확인을 위해 다양한 실험을 수행하였다.

3.1 풍속의 변화시 토크 시뮬레이터에서 발생하는 전력 및 토크 곡선 취득 실험

풍속의 변화를 주면서 발생하는 전력과 토크가 본 연구에서 모사한 Osiris 사의 Osiris10 과 동일하게 구현이 되었는지 확인하기 위해서 부하를 변동하여 회전속도에 대한 전력과 토크를 확인한 결과는 그림 14와 같다.

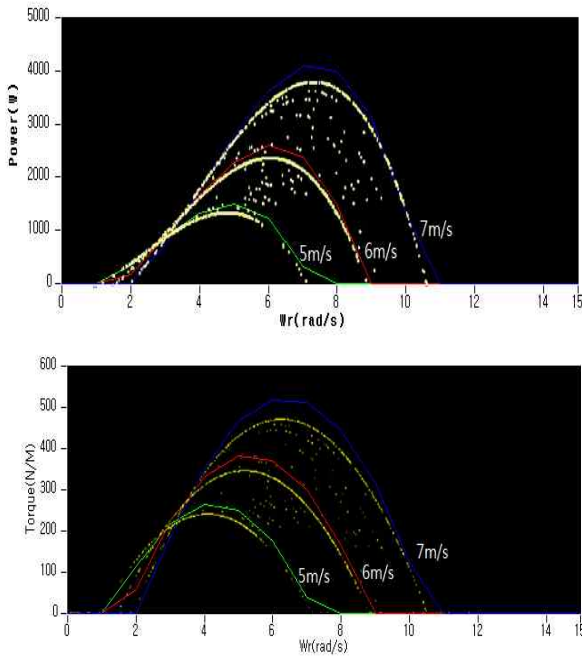


그림 14. 전력 및 토크 특성 그래프
Fig 14. Power and Torque characteristic curve

3.2 DC-DC 부스트 컨버터의 듀티비 변화에 따른 발전기 출력 특성 곡선 취득 실험

Arduino Mega 2560을 이용하여 부스트 컨버터의 스위칭 소자에 인가되는 PWM 신호의 듀티비를 조절하여 토크 제어를 수행한 결과는 그림 15와 같다.

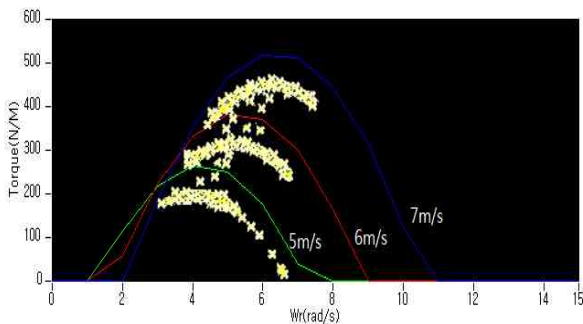


그림 15. W_r-Torque 곡선상의 토크 제어 수행 결과
Fig 15. result of Torque control for W_r-Torque curve

실험을 위해 사용된 전체 시스템을 나타내면 그림 16과 같다.

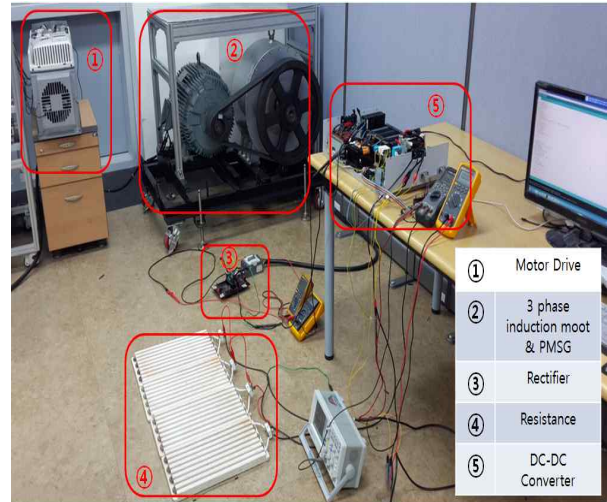


그림 16. 토크시뮬레이터 시스템 구성
Fig 16. Overall configuration of torque simulator

4. 결론

본 연구에서는 10kW급 풍력발전기의 기계적인 요소인 블레이드와 발전기에서 생산되는 전력을 처리하기 위한 전력제어 장치의 체계적인 설계를 위해 10kW급 풍력발전기의 공력 특성을 모사하여 전력 변환장치의 성능 평가를 수행할 수 있게 하는 토크 시뮬레이터를 개발하였으며 개발된 토크 시뮬레이터를 이용한 가상의 풍력 발전기로 다양한 실험을 할 수 있게 되었다.

References

- [1] S.J Kim, B.M Kim and S.H Kim, "Design of CRIO-based real-time controller for small-sized wind turbine generating system and comparative study on performance of various MPPT algorithms", *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent System*, Vol. 21, No.1, pp. 55-61, 2011.
- [2] Jung Su Kim, Hyung Woo Lee, No Fill Park, Young Duk Kim, Soo Yum Kim and Dong Hwan Lee, "Characteristic of Vibration in Windturbine System", *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 35, no. 6, pp. 786-795, 2011.
- [3] Dong Hyun Kim, Hyun Chul Choi, Jong Wook Lee, Gyeong Joong Ryu, Sung Bok Kim, Kwang Won Kim, Hyo Woo Nam and Myoung Goo Lee, "Aerodynamic and Structural Design of 6kW Class Vertical-Axis Wind Turbine", *Journal of Fluid Machinery*, vol. 14, no. 2, pp. 52-58, 2011.

저 자 소 개



김세윤(Se-Yoon Kim)
2008년 : 군산대학교 전자정보공학부 졸업
2013년 : 동 대학원 석사
2013년~현재 : 동 대학원 박사 과정

관심분야 : 풍력발전, 고장진단 및 검출, 지능형 시스템
Phone : +82-010-4278-0053
E-mail : ksydiary@kunsan.ac.kr



김성호(Sung-Ho Kim)
1984년 : 고려대학교 전기과 졸업
1986년 : 동 대학원 석사
1991년 : 동 대학원 박사
1988년~1990년 : 고려대 생산기술 연구소 연구원
1995년~1996년 : JAPAN HIROSHIMA University POST-DOC

1991년~현재 : 군산대학교 제어로봇 공학과 교수
관심분야 : 풍력발전, 인공신경망, 센서 네트워크, 공장 자동화, 고장진단
Phone : +82-010-2610-1224
E-mail : shkim@kunsan.ac.kr



이종희(Jong-Hee Lee)
2007년 : 경일대학교 전기제어과 졸업
2009년 : 경북대학교 산업대학원 석사 수료
2006년~현재 : (주)SESS

관심분야 : 인버터, 컨버터, 공장자동화, 전력변환, ESS
Phone : +82-010-4948-8057
E-mail : leejh8057@sess21.co.kr



문진영(Jin-Young Moon)
2010년 : 군산대학교 전자정보공학부 졸업
2012년 : 동 대학원 석사
2012년~2014년 : 동 대학원 박사 수료
2014년~현재 : 미래테크

관심분야 : 풍력발전, 인공신경망, 센서 네트워크, 공장 자동화, 고장진단
Phone : +82-010-2972-0351
E-mail : nalba01@gmail.com