

과풍속 영역에서의 약계자 제어를 이용한 풍력발전용 3상 PWM 컨버터의 출력제어

구현근¹, 김재흥², 이형욱³, 김장목[†]

Power Control of Three Phase PWM Converter for Small-scale Wind Power using Flux Weakening Control in Over Wind Speed Region

Hyun-Keun Ku¹, Jae-Heung Kim², Hyung-Uk Lee³, and Jang-Mok Kim[†]

Abstract - This paper proposes the battery charging algorithm for small-scale wind power generator using three phase PWM converter. it is impossible to control output power of the converter in over wind speed region since back EMF of PMSG is higher than battery voltage. Therefore, battery charging algorithm is proposed to expand battery charging over wind speed region. The suggested method is using the q-axis current for battery charging in the rated wind speed region. In the over wind speed region after it lower back EMF of PMSG using d-axis current it can control output power of the converter. The validity of the proposed algorithm are verified by experiments.

Keywords: small-scale wind power, three phase PWM converter, battery charging, flux weakening, over wind speed

1. 서 론

스파이럴 블레이드는 독립전원용 도심형 소형 풍력발전기로써 새로운 형태의 블레이드이다^[1]. 그림 1은 풍동에 장착된 스파이럴 블레이드의 외관의 모습이다. 기존 소형 풍력 발전기 전력 변환 장치 (wind energy conversion system, WECS)는 일반적으로 3상 다이오드 정류기와 DC/DC 컨버터로 구성된다^[2]. 하지만 이와 같은 전력변환장치의 구성 시 발전기 측 역률이 낮고 DC 단 전류 리플에 따른 토크 맥동이 발생하며 발전기 측 소음이 유발되고 블레이드 수명이 저하된다. 개발된 Spiral 블레이드는 도심형 풍력발전기로써 낮은 소음 수준과 전력파트에 비해 고가인 블레이드의 수명 향상을 위한 토크 맥동 개선을 요구하였다. 따라서 기존의 3상

다이오드 정류기와 DC/DC 컨버터가 결합된 형태가 아닌 3상 PWM 승압형 컨버터를 적용하여 소음 및 토크 맥동을 감소시키고자 본 연구를 진행하였다. 하지만 발전기의 역기전력이 배터리 전압보다 높은 경우 컨버터 출력 제어가 불가능하다. 특히 과 풍속 영역에서 출력제어가 불가능한 경우 배터리 및 전력변환장치의 수명과 안전에 악영향을 미치므로 과 풍속 영역에서는 발전을 정지하거나 더미 저항(dummy load)을 통해 블레이드를 감속시켜야 출력제어가 가능해진다.

이에 본 논문에서는 과 풍속 영역에서 약계자 제어를 적용하여 충전가능 풍속구간을 증가시키는 알고리즘을 제안한다. 정격 풍속 영역에서는 q 축 전류 성분만을 이



Fig. 1 The manufactured spiral blade rotor in wind tunnel

Paper number: TKPE-2014-19-2-7

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: jmok@pusan.ac.kr, Dept. of Electrical Eng., Pusan National University

Tel: +82-51-510-2366 Fax: +82-51-513-0212

¹ Dept. of Electrical Eng., Pusan National University

² C&M Control Team, LG Electronics

³ Interdisciplinary Program in Robot Relation., Pusan National University

Manuscript received Jan. 29, 2013; accepted Feb. 3, 2014

용하여 출력제어를 하게 되고, 과 풍속 영역에서는 d 축 전류를 이용하여 발전기의 역기전력을 낮추고, q 축 전류를 통해 배터리 충전 제어를 한다. 이는 발전기 상전류가 최대 허용 전류에 도달할 때까지 제어가능하다. 제안한 알고리즘을 통해 시스템 효율 증가 및 더미 저항 용량을 낮춰 시스템 단가를 감소시킬 수 있으며, 이를 실험을 통해서 확인하였다.

2. 풍력 에너지 특성

바람은 공기의 흐름이므로 바람이 갖는 에너지는 운동에너지이다. 풍력에너지는 식 (1)과 같이 된다^{[3][4]}.

$$P = \frac{1}{2}(\rho A V) V^2 = \frac{1}{2} \rho A V^3 [W] \tag{1}$$

여기서, 풍력 에너지의 총량 $P[W]$ 는 공기 밀도 $\rho [kg/m^3]$, 블레이드 단면적 $A[m^2]$, 풍속 $V[m/s]$ 의 곱으로 표현된다. 정격 풍속 이후 과 풍속 영역에서는 풍속이 증가함에 따라 풍력 에너지가 급격히 증가하기 때문에 풍력발전 시스템 보호를 위해서는 과 풍속 구간에서 컨버터 출력제어가 필수적이다.

출력계수(Power Coefficient, C_p)는 자연풍으로부터 풍차를 통하여 얻을 수 있는 에너지의 비율을 말하며 식은 다음과 같다.

$$C_p = \frac{P_{blade}}{\frac{1}{2} \rho A V^3} \tag{2}$$

설계된 스파이럴 블레이드의 출력계수의 값은 0.26이며, 양력과 항력을 모두 이용하는 형태의 블레이드이다. 주속비(Tip Speed Ratio, λ)는 풍속에 대한 블레이드 단 운동속도의 비를 의미하며 식은 다음과 같다.

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{V} \tag{3}$$

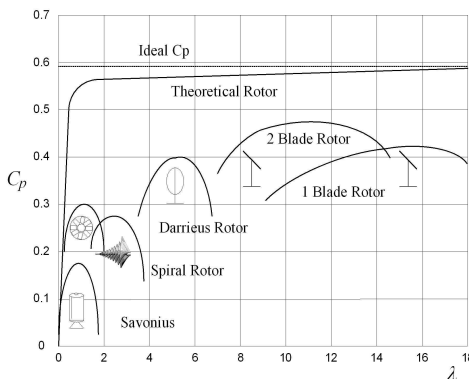


Fig. 2 Relationship between C_p and TSR according to blade type

그림 2는 블레이드 종류에 따른 효율 특성을 나타낸 그래프이며, 주속비가 낮을수록 저속-고토크 출력, 높을수록 고속-저토크 출력 특성을 갖는다. 또한 낮은 주속비를 갖는 블레이드일수록 이용 가능한 주속비 구간이 좁게 나타나고, 이와 반대일수록 넓은 주속비 범위를 갖는다. 다시 말해서, 전자의 경우에는 출력의 변화량이 크더라도 속도 변화량이 적기 때문에 발전기 역기전력의 변화량이 적으므로, 약계자 제어를 통한 충전 구간 확보가 용이하게 된다. 후자의 경우에는 같은 출력 변화량에 대해 속도의 변화량이 크기 때문에 발전기 역기전력 변화폭이 넓게 되고, 이 경우 약계자 제어를 이용 가능한 영역이 줄어들게 된다. 따라서 좁은 주속비 범위를 갖는 블레이드일수록, 제안한 알고리즘을 더 유리하게 적용 가능하다.

3. 풍력 발전시스템의 성능과 지표

정격 풍속이란 설계상의 최대 연속 출력을 나타내어 정격출력이 얻어지는 풍속을 말한다. 정격출력은 일반적으로 풍속의 출현 확률 분포로부터 풍력 에너지를 가장 많이 뽑아 낼 수 있는 풍속으로 통상 12~14m/s 정도이다. 시동 풍속은 블레이드와 결합된 발전기가 발전을 개시할 때의 풍속이며 3~5m/s정도 이다. 중단풍속은 강풍으로 인한 발전기 및 시스템의 보호를 위한 과속 방지와 발전을 정지하는 풍속으로 20~25m/s정도이다.

그림 3은 풍속과 출력의 관계를 개념적으로 나타내고 있으며, 붉은색으로 도색된 부분은 제안하는 알고리즘을 통해 확장된 배터리의 충전 가능 영역을 보여준다.

4. 약계자 제어 방법

표면 부착형 동기전동기의 $d-q$ 축의 인덕턴스는 동일한 값이며 계자 자속이 일정하게 공급되므로 전압 방정식이 간단하고 해석이 용이하다. 약계자 제어 영역에서 필요로 하는 d -축 전류 지령은 직접 계산을 통해 획득 가능하다^{[5][6]}.

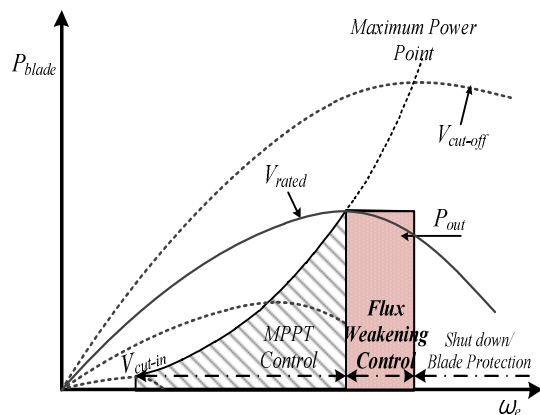


Fig. 3 Relationship between power and wind speed

4.1 정토크 영역

정토크 영역은 전압 여유가 충분한 구간으로 단위 전류 당 최대 토크를 구현한다. d -축 전류 성분, I_{ds}^r 를 '0' 으로 고정 시켜 제어 하며 이때의 토크 및 출력은 식 (4),(5)로 표현된다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_m I_{qs}^r \quad (4)$$

$$P_e = T_e \omega_r \quad (5)$$

전동기의 단자 전압은 고속 운전 영역에서 저항을 무시하여 식 (6)로 나타난다.

$$\begin{aligned} |v_{dqs}^r| &= \sqrt{v_{ds}^{r2} + v_{qs}^{r2}} \\ &= \omega_r \sqrt{(L_s i_{qs}^r)^2 + (\lambda_m + L_s i_{ds}^r)^2} \end{aligned} \quad (6)$$

최대 토크 운전은 식 (7)로 표현되며, 이러한 정토크 운전으로 획득 가능한 최대 속도는 식(8)로 나타난다.

$$\begin{aligned} |v_{dqs}^r| &= V_{smax} \\ i_{ds}^r &= 0 \\ i_{qs}^r &= I_{smax} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\omega_{base} = \frac{V_{smax}}{\frac{P}{2} \sqrt{\lambda_m^2 + (L_s I_{smax})^2}} \quad (8)$$

4.2 정출력 영역

표면 부착형 동기전동기의 발생 토크는 q -축 전류 성분, I_{qs}^r 에 직접 비례하기 때문에 정출력 운전을 위한 q -축 전류 지령은 식 (9)로 표현된다.

$$i_{qs}^r = \frac{\omega_{base}}{\omega_r} I_{smax} \quad (9)$$

한편, 정출력 운전 즉 약계자 운전 영역에서는 전압을 최대로 이용하고 있으므로 저항을 무시 하였을 때의 전압식은 다음과 같이 표현되어 진다.

$$V_{smax} = \frac{P}{2} \omega_r \sqrt{(\lambda_m + L_s i_{ds}^r)^2 + (L_s i_{qs}^r)^2} \quad (10)$$

식(8)을 식 (10)의 형태로 나타내면 식 (11)은 정토크와 약계자 운전의 경계점에 대한 조건식이 된다.

$$V_{smax} = \frac{P}{2} \omega_{base} \sqrt{(\lambda_m^2 + L_s I_{smax})^2} \quad (11)$$

또한, 식 (10)과 전류 제한원 수식인 $i_{ds}^{r2} + i_{qs}^{r2} = I_{smax}^2$ 을 이용하여 d -축 전류 지령을 구하면 식 (13)이 된다.

$$i_{ds}^{r*} = \frac{V_{smax}^2 - \lambda_f^2 \omega_r^2 - I_{smax}^2 \omega_r^2 L_s^2}{2 \lambda_f \omega_r^2 L_s} \quad (13)$$

즉, 정출력 운전을 가능토록 하기 위한 전류 조건은 각 축에 대해 식 (9) 및 식 (13)로 주어진다. 약계자 제어를 통하여 정출력 운전을 할 수 있는 속도 한계는 ω_c 로 그림 4에 도시하였다. 이러한 정출력 운전 구간은 그림 4의 실선으로 표시되어 있으며, 이는 인버터가 공급 가능한 최대 전류를 활용하지 않고 있으며, 전동기 속도가 정출력 운전 한계속도, ω_c 를 벗어나게 되면 전류 궤적은 최대 전류원을 따라 제어 되어야 하고, 이 구간에서는 토크가 급격히 떨어지며 정출력 운전이 불가능한 구간이다.

5. 제안하는 약계자 제어 알고리즘

제안하는 약계자 제어 알고리즘은 그림 3과 같이 정격 풍속 영역, 과 풍속 영역, 중단 풍속 영역의 세 영역으로 구분할 수 있다.

5.1 정격 풍속 영역

정격풍속 영역은 블레이드가 회전을 시작하는 풍속부터 블레이드 정격 출력을 발생시키는 정격풍속까지를 말하며, 이때는 풍속에 따라 최대 출력을 발생시키는 최대출력 추종제어 (Maximum Power Point Tracking control)를 시행한다. 이 영역에서는 수시로 변하는 바람에 대하여 최대 출력점을 잃지 않도록 응답성이 빠른 특성의 MPPT제어기가 필요하다^{[7][8]}. 이때는 발전기 출력 전압이 배터리 전압보다 낮기 때문에 3 상 PWM 컨버터의 일정 출력 제어를 시행한다.

5.2 중단 풍속 영역

중단 풍속 이후부터는 블레이드의 과 회전으로부터 시스템 보호를 위해 기계적 보호 장치나 전기적 더미

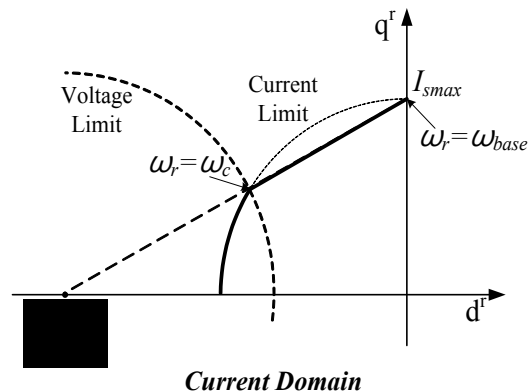


Fig. 4 Current operating boundary of direct current control as constant power region

저항 등을 통해 블레이드 속도를 줄여 발전 전압을 낮추어 출력을 제어한다.

5.3 제안하는 약계자 제어를 이용한 과 풍속 영역에서의 PWM 컨버터의 출력 제어

그림 5는 제안하는 알고리즘의 전체 블록 다이어그램이다. 알고리즘 동작순서는 다음과 같다. 정격풍속 이내 영역에서는 MPPT 제어기를 통해 전류 지령을 발생시킨다. 바람이 증가하게 되어 발전기 역기전력이 배터리 전압보다 높아지게 되는 경우 발전기 속도를 통해 역기전력을 추정하고 이를 배터리 단자 전압과 비교하여 배터리 전압이 더 높을 경우 약계자 제어기가 동작하게 된다.

d -축 전류 지령은 전압 제한원과 전류 제한원을 통해 얻어진 d -축 전류 지령 방정식을 통해 현재의 속도를 피드백 받고 생성된다. 이렇게 생성된 d -축 전류 지령은 음의 값을 가지게 된다.

$$v_{ds}^r = R_s i_{ds}^r - \omega_r L_s i_{qs}^r \quad (14)$$

$$v_{qs}^r = R_s i_{qs}^r + \omega_r L_s i_{ds}^r + \lambda_m \omega_r$$

위의 식 (14)로 표현되는 영구자석형 동기전동기의 d - q 축 전압 방정식 우변의 항 중 d -축 전류가 포함되는 항은 음의 값을 가지게 되므로 PWM 컨버터의 입력이 되는 발전기 단자 전압은 감소하게 된다^[9]. 따라서

과 풍속 구간에서 약계자 제어를 적용하면 배터리 전압보다 발전기 단자 전압을 낮게 유지 할 수 있다. q -축 전류지령은 d - q 축 전압 전류를 통해 컨버터 입력 전력을 구한 뒤 이를 출력 지령과 비교하여 생성하게 된다. 과 풍속 영역에서는 바람의 세기가 커짐에 따라 d -축 전류 지령은 증가하고 q -축 전류 지령은 감소하는 모습을 가진다. 시스템 보호를 위한 중단 풍속의 설정은 발전기 용량에 따라 달라지며, 발전기 최대 허용 전류인 I_{smax} 보다 I_s 전류가 커지게 될 때를 기점으로 한다. I_s 는 d - q 축 전류를 합성한 상전류를 나타낸다.

6. 실험 결과

풍력 발전용 전력변환장치는 그림 6과 같다.

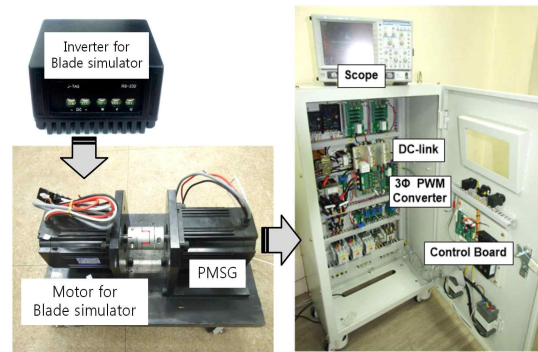


Fig. 6 Experiment set for small-scale WECS

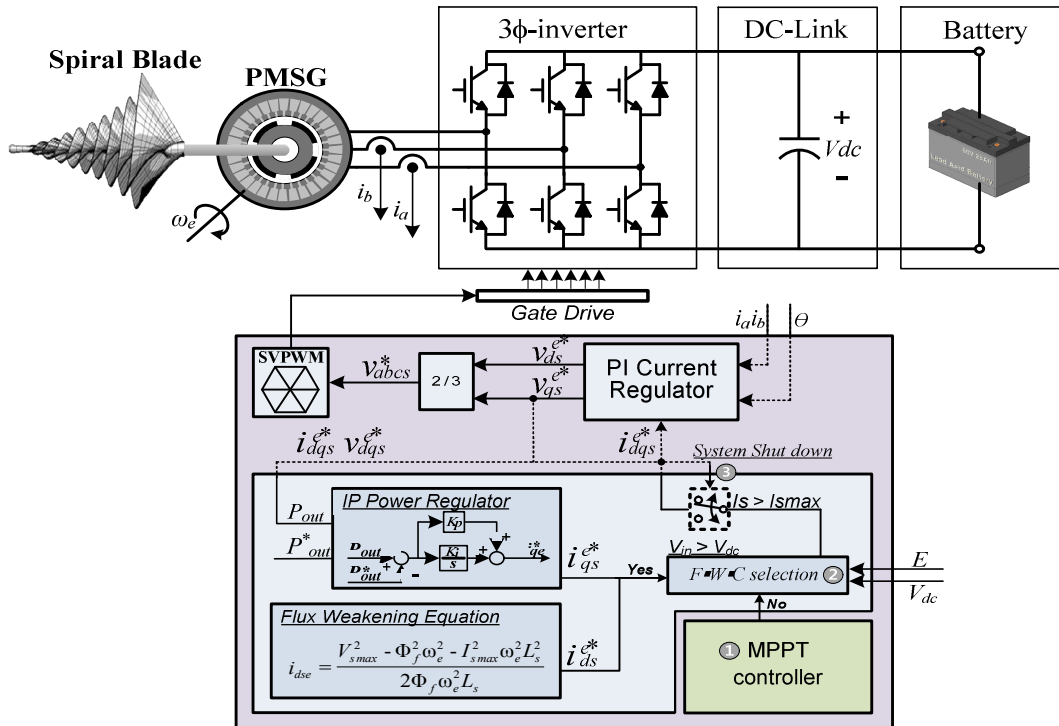


Fig. 5 Block diagram for battery charging in WECS

Table 1 Simulation parameter

Wind Turbine Simulator	
Rated Output Power	400 W
Rated Wind Speed	12 m/s
Maximum Coefficient	0.26
Radius	0.51
Generator(PMSG) for WECS	
Rated Output Power	1 kW
Rated Speed	3000 rpm
Voltage Constant Ke	33 V/krpm
Pole	8
Rs	0.141 ohm
Ls	1.755 mH
Battery	
Type	Lead Acid Battery
Voltage	60 V
Ampere	59 Ah

블레이드 시뮬레이터를 제작하여 M/G를 이용하여 실험하였다. 블레이드 시뮬레이터의 속도, 출력 곡선은 그림 7과 같다. 블레이드 시뮬레이터는 정격 풍속(12m/s)에서 400W의 출력을 갖는다. 실험 조건 및 파라미터는 표 1과 같다.

그림 8(a)는 정격 풍속(12m/s)에서의 발전기 상전류 및 배터리 충전 전류를 나타내며, 그림 8(b)는 컨버터 출력 및 배터리 전압을 나타낸다. 정격 풍속에는 일반적인 PWM 컨버터의 출력 전압을 제어 하고 있으며, 이에 발전기 출력 상전류가 정현파 형태로 제어되고 있기 때문에 배터리 충전 전류는 직선 형태에 가까워 전류 리플이 매우 작고 발전기 측 토크 맥동도 낮은 상태이다.

그림 9는 과 풍속 영역(13.5m/s)에서 약제자 제어를 적용하지 않았을 경우를 나타낸 실험 파형이다. 이때는 발전기 속도가 상승하여 발전기의 역기전력이 배터리 단자 전압보다 높은 값을 가지게 됨으로 PWM 컨버터의 전류 제어가 불가능하다.

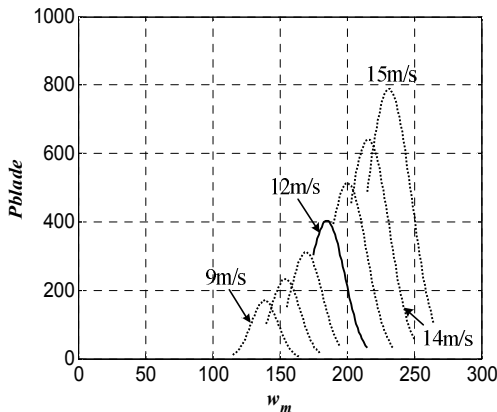
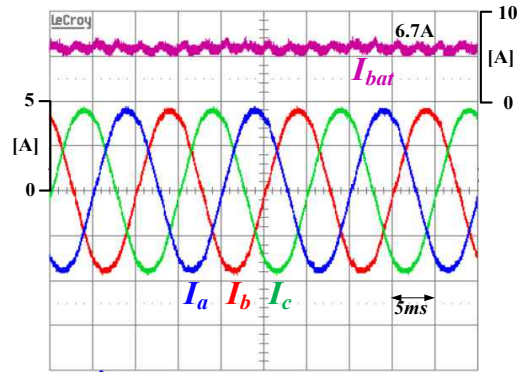
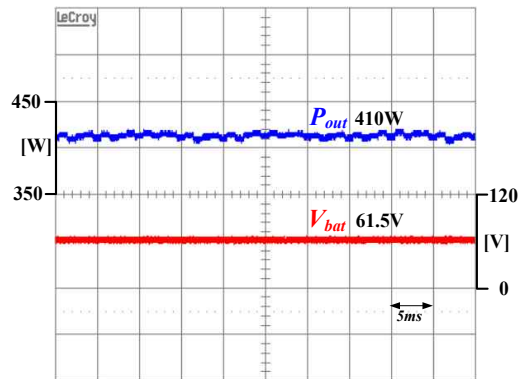


Fig. 7 Output power curve of designed wind turbine by wind speed

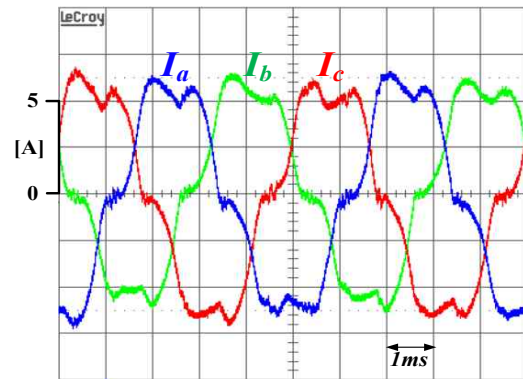


(a) Generator output currents and battery input current

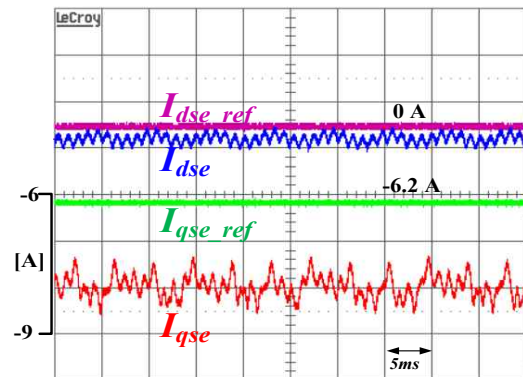


(b) Converter output power and battery Voltage

Fig. 8 Operation of rated wind speed region



(a) Generator output currents



(b) Converter d-axis, q-axis currents

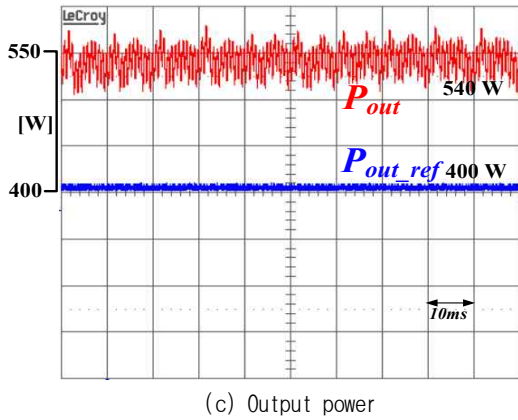
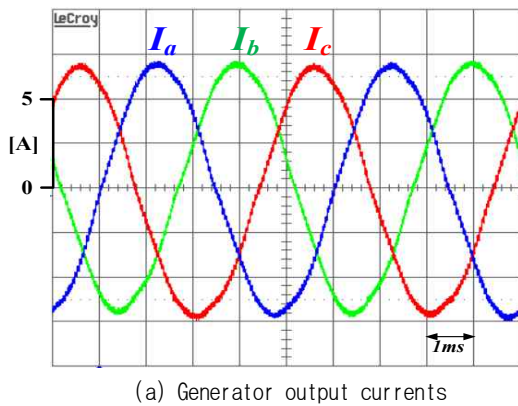
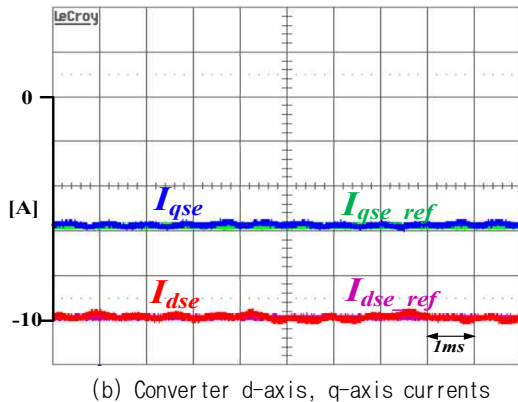


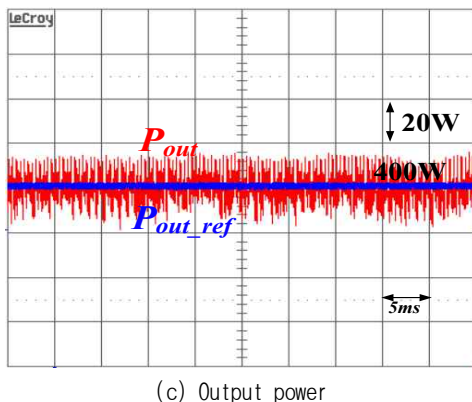
Fig. 9 Operation before flux weakening control



(a) Generator output currents



(b) Converter d-axis, q-axis currents



(c) Output power

Fig. 10 Operation after flux weakening control

그림 10은 그림 9와 동일한 과 풍속 영역(13.5m/s)에서 제안하는 약계자 제어를 적용한 실험 파형이다. 발전기 역기전력이 배터리 단자 전압보다 높은 상태이지만, 컨버터의 d -축 전류를 통해 일정 출력의 배터리 충전을 수행하게 된다.

그림 11은 정격 풍속과 과 풍속 영역에서 제안하는 알고리즘의 투입 여부에 따른 배터리 발전기 출력 전압과 배터리 단자 전압을 나타내며, 과 풍속 영역에서 제안하는 방법을 통해 발전기 속도는 하강하며 일정한 출력으로 제어가 되고 있음을 보여준다.

그림 12 (a)~(d)는 제안하는 알고리즘의 과도 상태 특성을 확인하기 위해 풍속을 12~13.5m/s로 가변 시켜 가며 실험한 결과이며, 정격 풍속에서 과 풍속 구간으로 전환 시 약계자 방정식을 통해 d -축 전류 지령이 발생되어 발전기 발생 역기전력은 배터리 전압이하로 감소되고, 출력 전압 제어를 통해 q -축 전류 지령을 생성함으로 3상 PWM컨버터의 일정 출력 제어를 수행한다.

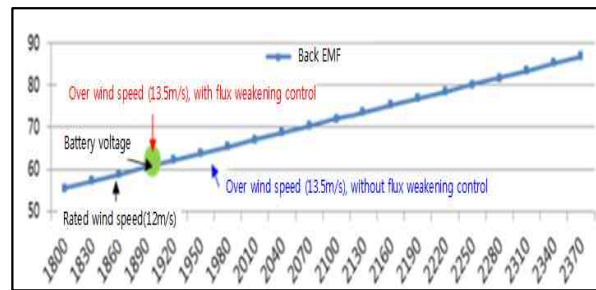
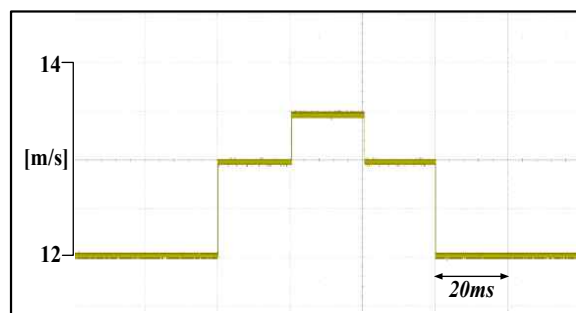
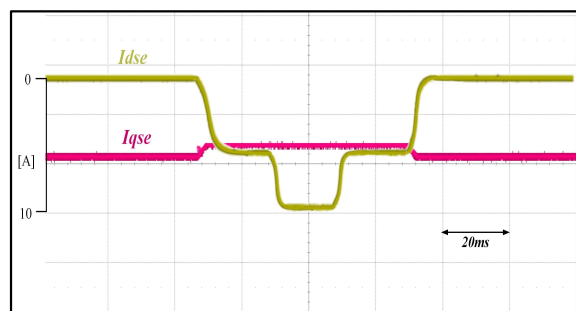


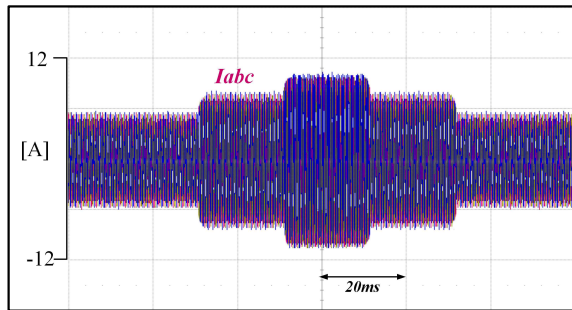
Fig. 11 Generator output voltage and Battery voltage of three different wind speed conditions



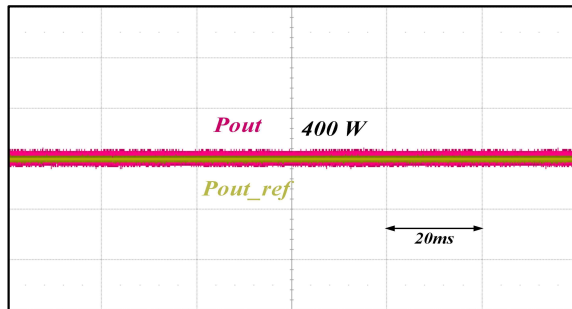
(a) Variable wind speed from 12m/s to 13.5m/s



(b) d-axis and q-axis current of PWM converter



(c) Phase currents of generator



(d) Output power of PWM converter

Fig. 12 Experiments of variable wind speed

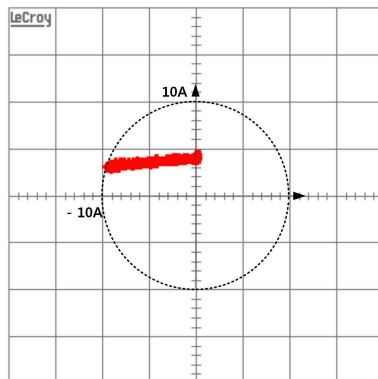


Fig. 13 Idq trajectory for constant output power during over-wind speed region

그림 13은 d - q 축 전류 지령을 각각 좌표축으로 하여 d - q 축 전류의 변화를 나타낸 파형이다. 일정 출력이 가능하도록 d - q 축 전류 지령이 발생되고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 정격 풍속 12 m/s 이후 과 풍속 영역 14.5 m/s까지 블레이드 출력 이용 구간을 확장 시킬 수 있다.

7. 결 론

본 논문에서는 과 풍속 영역에서의 소형풍력발전 시스템의 배터리 충전 알고리즘 기법을 제안하였다. 기존의 소형 풍력 발전기 전력 변환 장치는 3상 다이오드 정류기와 DC/DC 컨버터로 구성되어 발전기 측 역률이 낮고 출력 전류 리플로 인한 토크 리플이 발생하며, 충

진 시 소음 및 진동으로 인한 블레이드 수명이 저하된다. 제안한 방법은 3상 PWM 컨버터 사용 시 정격 풍속 이후 충전 불가능한 영역을 충전 가능하게 하여, 시스템 효율을 증가 시키고, 시스템 비용을 절감시킨다. 실험을 통하여 제안하는 제어기법의 타당성을 검증하였다.

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

References

- [1] Q. Lu, Q. Li, Y.K. Kim and K.C. Kim. "A study on design and aerodynamic characteristics of a spiral-type wind turbine blade," *Journal of KSV*, Vol. 10, No. 1, pp. 27-33, 2012.
- [2] G. Lo Bianco, O. Honorati, and F. Mezzetti, "Small-size stand alone wind energy conversion system for battery charging," in Proc. 31st Universities Power Engineering Conf., Iraklion, Greece, pp. 62-65, 1996.
- [3] Kuo-Yuan Lo; Yaow-Ming Chen. "MPPT Battery Charger for Stand-Alone Wind Power System," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 26, pp. 1631-1638, 2011.
- [4] Y. L. Juan, "An integrated-controlled AC/DC interface for microscale wind power generation systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 26, No. 5, pp. 1377 - 1384, May 2011.
- [5] J.H.Song, J.M.Kim, S.K.sul, "A New Robust SPMSM Control to Parameter Variations in Flux Weakening Region," in *proc. IEEE IECON'96*, pp. 1193-1198, 1996.
- [6] Ki-Chan Kim. "A Novel Magnetic Flux Weakening Method of Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicles," *IEEE Transactions on magnetics*, Vol. 48, No. 11, Nov. 2012.
- [7] Eftichios Koutroulis, Kostas Kalaitzakis, "Design of a Maximum Power Tracking System for Wind-Energy-Conversion Applications," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 53, No. 2, pp. 486-494, April 2006.
- [8] S. M. R. Kazmi, H. Goto, H.-J. Guo, and O. Ichinokura, "A novel algorithm for fast and efficient speed-sensorless maximum power point tracking in wind energy conversion systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 58, No. 1, pp. 39-36, 2011.
- [9] Wang xin, Cao Mingfeng, Qiu Li, Chai Lulu, Qin Bin, "Control of Direct-drive Permanent-magnet Wind Power System Grid-Connected Using Back-to-back PWM Converter," *ISDEA, 2013 Third International Conference on*. pp. 478-481, Jan. 2013.



구현근(具賢根)

1984년 12월 11일생. 2009년 부산대 전자전기통신공학부 졸업. 2009년~현재 동 대학원 석·박사 통합과정.



김재흥(金載興)

1985년 3월 14일생. 2011년 경상대 공대 전기공학과 졸업. 2013년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2013년~현재 LG전자 재직.



이형욱(李炯旭)

1986년 1월 19일생. 2011년 부산대 전자전기공학부 졸업. 2012년~현재 동 대학원 로봇관련협동과정 석사과정.



김장묵(金長睦)

1961년 8월 6일생. 1988년 부산대 전기공학과 졸업. 1991년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1997년~2001년 한전 전력연구원 선임연구원. 2007년 Florida State University 방문교수. 2001년 3월~현재 부산대 전기공학과 교수. LG전자 스마트제어 센터장.