배터리 충전을 위한 소형풍력 발전 시스템의 한계 풍속에 관한 연구

A Study on the Cut-off Speed of Small-scale Wind Power System for Battery Charging

구 현 근* · 이 형 욱** · 김 장 목†
(Hyun-Keun Ku · Hyung-Uk Lee · Jang-Mok Kim)

Abstract - Three phase PWM(Pulse Width Modulation) converter of the small-scale wind power system is able to charge battery under the rated wind speed regions. However, it is impossible to control output power of converter at the over win speed region because back-EMF(Electro Motive Force) of PMSG(Permanent Magnet Synchronous Generator) is higher than the battery terminal voltage of PMSG is reduced. However, the cut-off wind speed exists although battery charging algorithm is implemented by flux weakening control method. Therefore, this paper performs analysis of other factors which affects limitation wind speed. The validity of the analysis are verified through simulation.

Key Words : Small-scale wind power, Three phase PWM converter, Battery charging, Flux weakening, Over-wind speed

1. 서 론

최근 화석연료의 고갈 및 환경문제로 인해 신재생에너지에 대한 관심이 해마다 증가하고 있다. 신재생에너지는 깨끗하고 재사용이 가능한 에너지원으로 풍력과 태양광 및 태양열을 이용한 방법이 대표적이다. 이들 중 풍력 발전시스템은 자연의 바람을 이용하여, 바람의 운동에너지를 전기에너지로 변환하는 방식이다. 기존의 풍력 발전시스템은 육·해상의 대형 풍력에 집중되어 있었지만, 최근 환경 및 소음 문제를 해결하고 도심의 그린화를 목적으로 하는 소형 풍력 발전시스템에 대한 관심이 증가하고 있다[1]. 그림 1은 배터리 충전용 독립형 소형 풍력 발전시스템을 구성하기 위해 개발된 아르키메데스 형태의 스파이럴 블레이드의 모습이다[2]. 배터리 충전을 위하여 PWM 컨버터를 전력변환장치로 채택하였고 이는 발전기 상전압의 정현파 제어로 역률 및 토크를 개선하는 효과를 가진다. 또한, 이를 이용해 발전기 측 약계자 제어를 실시하여 과풍속 구간에서 배터리 충전 전류 제어가 가능함으로 배터리 충전 가능 구간이 확장되는 장점을 가지게 하였다. 하지만 약계자 제어를 적용하여도 배터리 충전 전류의 제어가 불가능한 풍속 구간이 존재하게 되며, 이 구간에서는 배터리 과충전 및 과전류로 인해 배터리의 수명에 악영향을 끼치게 된다.

따라서 약계자 제어를 적용하여도 배터리 충전 전류 제어

그림 1 개발된 스파이럴 블레이드
Fig. 1 The developed spiral blade

가 불가능한 풍속에서는 시스템 보호를 위한 방지대책을 수행하여야 하며, 본 논문에서는 약계자 제어를 적용하여도 충전 전류 제어가 불가능해지는 풍속과 이에 영향을 미치는 요인을 수식과 시뮬레이션을 통하여 분석하였다.

2. 한계 풍속에 대한 해석

2.1 풍속에 따른 소형풍력발전시스템의 제어 방법

그림 2는 PWM 컨버터를 전력변환장치로 사용하는 풍력 발전시스템의 제어방법을 풍속에 따라 나타낸 것이다. 발전기의 역기전력이 배터리의 단자 전압보다 낮은 정격 풍속 구간 V_{rated} 내에서는 MPPT 제어를 적용하여 배터리를 충전하며, 정격 풍속인 V_{rated} 보다 더 큰 과풍속 구간에서는 발전기의 약계자 제어를 적용하여 배터리를 충전할 수 있

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering,
Pusan National University, Korea
E-mail : jmok@pusan.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Pusan National University,
Korea

** Samsung Heavy Industries Co. LTD

Received : December 18, 2013; Accepted : February 25, 2014

다. 발전기의 약계자 제어 시 d-축 전류의 영향으로 d-q축 전압의 크기가 감소하므로 발전기의 단자전압은 낮아지게 되는데, 이는 곧 PWM 컨버터의 승압을 위한 전압여유가 생겼음을 의미하며 따라서 과풍속 구간에서 약계자 제어를 적용하면 배터리 충전 전류 제어가 가능해지므로, 배터리 충전 영역을 증가시킬 수 있다[3]. 그러나 약계자 제어영역은 발전기의 전압 및 전류 제한에 의해 한계가 있기 때문에 약계자 제어를 적용하여 배터리를 충전 할 수 있는 풍속 또한 제한된다. 즉, 배터리 충전 영역의 증가를 위하여 과풍속 구간에서 약계자 제어를 실시하여도 충전 전류 제어가 불가능한 풍속이 존재하고 본 논문에서는 이 풍속의 시작점을 약계자 제어 한계풍속 V_{Cutoff} 으로 정의하였다. 한계 풍속 V_{Cutoff} 이후의 풍속 구간에서는 충전 전류 제어가 불가능하므로 배터리의 과충전, 과전류 방지를 위하여 시스템 보호대책을 수행하여야 한다.

그림 2 풍속에 따른 소형 풍력 발전시스템 제어 방법

Fig. 2 Control method of small-scale wind power generation system according to wind speed

2.2 스파이럴 블레이드의 출력 특성

블레이드의 출력 특성은 공기로부터 유입되는 바람의 파워 P_{Wind} 와 블레이드가 획득 가능한 에너지 출력 계수인 C_p 를 통해 나타낸다. 블레이드의 종류에 따른 정확한 C_p 의 값은 수치해석을 통해 획득 가능하다. 공기의 흐름인 바람에 의한 파워는 풍속 V , 공기밀도 ρ 그리고 블레이드의 단면적 A 의 곱으로 표현할 수 있다[4].

$$P_{Wind} = \frac{1}{2}(\rho A V) V^2 = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (1)$$

바람으로부터 블레이드가 획득하는 블레이드 파워 P_{Blade} 는 출력계수에 의하여 결정된다. 일반적으로 피치각 제어를 하지 않는 소형 풍력 발전시스템의 출력계수 C_p 는 블레이드 회전속도 ω_m 와 반지름 R 과 풍속 V 으로 표현되는 주속비 λ 의 함수로 표현 할 수 있다. 주속비-출력계수 곡선은 일반적으로 벨(Bell)모양의 오목한 형태를 가지며 아래의 그림 3과 같이 최대 출력계수 값을 가지는 최적의 주속비가 존재한다.

그림 3 주속비에 따른 출력계수 곡선

Fig. 3 The curve of blade power coefficient

출력계수의 곡선은 수치 해석적으로 커브 피팅을 통하여 구할 수 있으며, 본 논문에 사용된 수식은 아래와 같다.

$$C_p = C_0 + C_1 e^{C_2 \left(\frac{\lambda - C_3}{C_4} \right)^2} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{\omega_m R}{V} : \text{주속비 or 선단속도비}$$

식 (2)의 파라미터는 C_0 는 Y축 이동, C_1 은 최대값 조절, C_2 는 기울기 조절, C_3 는 X축 이동, C_4 는 기울기 조절에 영향을 미친다. 블레이드의 출력 P_{Blade} 은 출력 계수 C_p 와 특정 풍속에서 공기에 의하여 블레이드에 공급되는 파워 P_{Blade} 를 통하여 아래의 식으로 표현된다.

$$P_{Blade} = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \quad (3)$$

2.3 발전기 약계자 제어 방법 - 정전류 영역

표면 부착형 영구 자석 동기발전기의 정전류 영역에서의 약계자 제어를 위해서는 발전기의 전압 제한원과 전류 제한원을 전류 평면상에서 도식화 하여 해석함으로써 약계자 제어 가능 영역을 쉽게 판단 할 수 있다. 그림 4는 전류 평면상에서 전압 제한원과 전류 제한원을 도식화 한 것이다. 영구자석 동기 발전기의 전압 제한원과 전류 제한원은 식 (4),(5)와 같다[5],[6]. V_{smax} 는 발전기 최대 상전압, I_{smax} 는 발전기 최대 고정자전류, λ_f 는 영구자석의 자속, L_s 는 발전기의 고정자 인덕턴스, i_{ds}^* , i_{qs}^* 는 회전자에 동기된 d-q축 전류이다.

$$\left(i_{ds}^* + \frac{\lambda_f}{L_s} \right)^2 + (i_{qs}^*)^2 = \left(\frac{V_{smax}}{\omega_r L_s} \right)^2 \quad (4)$$

$$i_{ds}^{*2} + i_{qs}^{*2} = I_{smax}^2 \quad (5)$$

정전류 영역에서 영구 자석 동기발전기의 정전류 영역에서의 약계자 제어 시의 전류 지령은 전류 제한원의 원호를 따라서 발생한다. 전압 제한원과 전류 제한원이 만나는 교점에서 약계자 제어가 가능하며 약계자 제어시의 d-축 전류 지령과 q-축 전류 지령은 식 (6),(7)과 같다.

그림 4 전류 평면상의 전압 제한원과 전류 제한원

Fig. 4 Voltage limit circle and current limit circle on current domain

$$i_{ds}^r = \frac{V_{smax}^2 - \lambda_f^2 \omega_c^2 - I_{smax}^2 \omega_c^2 L_s^2}{2\lambda_f \omega_c^2 L_s} \quad (6)$$

$$i_{qs}^r = \sqrt{I_{smax}^2 - i_{ds}^{r2}} \quad (7)$$

ω_{base} 는 풍력 발전시스템의 정격 풍속에서 최대 출력을 내는 발전기의 속도로 이때의 전류 지령은 $i_{qs}^r = I_{smax}$, $i_{ds}^r = 0$ 이며 약계자 제어를 적용하는 기준 속도이다. ω_c 는 약계자 제어를 통하여 낼 수 있는 발전기의 최고 속도로서, 이 때의 전류 지령은 $i_{ds}^r = I_{smax}$, $i_{qs}^r = 0$ 이며 발전기의 단자전압이 배터리의 단자전압과 같아지게 되므로 약계자 제어를 하여도 배터리 충전이 불가능한 지점이다.

2.4 수식 전개를 통한 한계풍속에 영향을 미치는 요인 분석

배터리 충전을 위한 소형 풍력 발전시스템은 배터리 충전 전력 곡선과 블레이드 출력 곡선의 교점에서 운전점을 형성하며 운전한다. 과풍속 구간에서 배터리 충전 영역 확장을 위하여 약계자 제어 적용 시 두 곡선의 교점이 존재하지 않는 풍속이 한계 풍속이다. 3상 PWM 컨버터를 통해 배터리로 충전되는 전력 P_{in} 은 발전기 출력전압을 계통 주파수로 변환한 동기좌표성분으로 다음과 같이 표현된다.

$$P_{in} = \frac{3}{2}(e_{qs}^r i_{qs}^r + e_{ds}^r i_{ds}^r) = \frac{3}{2} E i_{qs}^r \quad (8)$$

또한, 발전기의 역기전력(E)는 아래의 식 (9)로 정의된다.

$$E = \omega_e \lambda_f \quad (9)$$

위의 식 (6),(7),(8),(9)를 이용하여 배터리 충전 전력을 나타낼 수 있다.

$$P_{in} = \frac{3}{2} \lambda_m \omega_e \sqrt{I_{smax}^2 - \left(\frac{V_{smax}^2}{2\lambda_m L_s \omega_e^2} - \lambda_m^2 + I_{smax}^2 L_s^2 \right)^2} \quad (10)$$

배터리 충전 전력인 식 (10)과 블레이드 출력인 식 (3) 두 식을 연립하면 풍속에 대한 식 (11)로 표현이 가능하며, 이 식을 통하여 한계 풍속과 한계 풍속에 영향을 미치는 요인을 알 수 있다.

$$V = \sqrt{\frac{3\lambda_f \omega_e \sqrt{I_{smax}^2 - \frac{V_{smax}^2}{2\lambda_f L_s \omega_e} (1 - \lambda_f^2 + I_{smax}^2 L_s^2)^2}}{\rho A (C_p)}} \quad (11)$$

풍속에 관하여 정리된 위의 식으로부터 분모의 성분 중 공기밀도와 블레이드의 면적이 동일하다면, 한계 풍속에 영향을 끼치는 요인은 출력 계수 C_p 의 방정식임을 알 수 있다. 또한 분자의 성분 중 발전기의 자속 λ 과 인덕턴스 L_s 는 전압 제한원의 중심을 결정하는 요소로서 전압 제한원의 중심 위치에 따라서 한계 풍속의 크기가 변화함을 알 수 있다. 첫 번째 요소인 출력 계수는 블레이드의 설계 시 고려 사항이며, 두 번째 요소인 전압 제한원의 중심 위치는 발전기 설계 시 고려 사항이다.

2.5 한계풍속에 영향을 미치는 요인 시뮬레이션

식 (11)으로부터 소형 풍력발전시스템의 구성 요소 중 블레이드의 출력 특성과 발전기 전압 제한원 중심의 위치가 약계자 제어 시 한계풍속을 결정하는데 있어 영향을 미침을 알아내었다. 블레이드 출력 특성과 전압 제한원의 중심을 결정하는 발전기 인덕턴스의 영향을 알아보기 위하여 표 1의 조건으로 그림 5의 Matlab 시뮬레이션을 구성하였다. PWM 컨버터의 경우 낮은 전압을 높은 전압으로 승압하는 컨버터로 배터리 충전 전류 제어를 위해서는 발전기 출력 전압이 배터리 단자 전압 보다 낮아야 한다. 따라서 본 시뮬레이션에서는 3상 PWM 컨버터를 사용하여 배터리를 충전하기 위하여 12V 배터리를 5직렬 연결하여 배터리 전압이 60V가 되도록 구성하였다.

그림 5 소형풍력발전용 3상 PWM 컨버터 시뮬레이션

Fig. 5 Simulation configuration of three phase PWM converter for small-scale wind power generation system

표 1 시뮬레이션 구성 조건 및 발전기 출력 계수 파라미터

Tabel 1 Simulation conditions and blade power coefficient parameters

Wind Turbine Simulator	
Rated Output Power[W]	440
Rated Wind Speed[m/s]	11.4
Air Density[kg/m ³]	1.225
Maximum Coefficient	0.26
Radius[m]	0.51
Generator (PMSG)	
Flux linkage established by magnets [V.s]	0.07407
Pole pair	4
Rs[Ω], Ls[mH]	0.147, 1.755
Battery	
Type	Lithium-Ion
Nominal Voltage[V]	60
Rated Capacity[Ah]	25
Parameters of blade power coefficient	
C_0	0.01
C_1	0.58
C_2	-2
C_3	-4.8
C_4	1.06

그림 6 약계자 제어 시 충전 전력 곡선 및 한계 풍속과 전류 궤적

Fig. 6 Curves of charge power, cut-off wind speed and current on flux-weakening control

q-축 전류를 상전류 최대값 9.1A로 제어하면서 정격풍속 11.4m/s에서 최대 출력으로 배터리 충전 중 풍속을 점차 증가시켜 약계자 제어를 적용하여 배터리 충전 전류 제어가 불가능한 한계 풍속을 구하였다. 그림 6은 이상의 시뮬레이션 구성 조건에서의 약계자 제어 시 배터리 충전 전력 곡선과 블레이드 출력 특성 곡선을 나타낸다. 충전 전력 곡선이 만나는 가장 큰 블레이드 출력 특성 곡선은 12.5m/s의 풍속 곡선이며, 12.5m/s의 풍속이 한계 풍속이 된다. 이 때

의 전류 제한원 상에서의 전류 지령 궤적을 나타내며 이상의 조건을 기준으로 하여 블레이드의 출력 특성과 발전기의 자속 및 인덕턴스 변화 시의 영향을 알아보았다.

2.5.1 블레이드 출력 특성의 영향

식 (2)의 출력 계수 C_p 의 곡선은 구성 상수인 C_0, C_1, C_2, C_3, C_4 를 조절하여 출력 특성을 변경 할 수 있다. 구성 상수 C_2, C_4 는 출력 곡선의 기울기를 조절하는 상수이다. 한계 풍속은 정격출력 이후의 과풍속 영역에서 나타나므로 정격출력 이후의 곡선의 기울기의 변화를 주어 한계 풍속의 크기 변화를 알아볼 수 있다. 그림 7은 소형 풍력발전 시스템의 구성요소 중 다른 요소들은 동일하게 유지한 상태에서 C_2, C_4 를 변경하여 블레이드 출력 곡선의 기울기를 변경하였다. 최대 출력의 오른편 곡선의 기울기가 완만할수록 운전점인 충전 전력 곡선과 블레이드 출력 곡선의 교점이 형성되기 위해서는 낮은 풍속에서 블레이드 출력 곡선과 충전량 곡선이 교점을 이루어야 한다. 교점을 이루는 풍속이 감소하게 되면 약계자 제어를 통하여 배터리를 충전할 수 있는 영역이 감소한다. 시뮬레이션을 통하여 출력 곡선의 기울기를 완만하게 할 경우 한계 풍속이 12.5m/s → 11.8m/s로 감소하였다. 반면에 기울기가 가파를수록 높은 풍속에서의 블레이드 출력 곡선과 충전 전력 곡선의 교점이 형성되므로 약계자 제어를 통한 배터리 충전 영역은 증가한다. 시뮬레이션을 통하여 출력 곡선의 기울기를 가파르게 할 경우 한계 풍속이 12.5m/s → 13.1m/s로 증가하였다.

2.5.2 발전기 인덕턴스의 영향

약계자 제어 시 발전기의 전압 제한원은 식(4)로 표현되며, 전압 제한원의 중심점은 자속과 인덕턴스의 영향에 의하여 중심점의 위치가 이동한다. 본 시뮬레이션에서는 전압 제한원 중심 위치에 따른 한계풍속의 영향을 알아보기 위하여 자속의 변화는 없다고 가정하고 인덕턴스의 값을 변화시켜 전압 제한원의 중심점을 이동시켜 시뮬레이션을 실시하였다. 기존의 1.755mH에서 50% 증가시킨 2.633mH, 75% 증가시킨 3.086mH의 인덕턴스 값을 이용하여 이 때의 전압 제한원 중심의 위치와 약계자 제어 시의 한계풍속을 알아보았다. 그림 9는 인덕턴스 변화에 따라 전압 제한원의 중심이 준의 (-42.2, 0)에서 인덕턴스의 값이 증가함에 따라 (-28.1, 0), (-24, 0)로 원점에 가깝게 이동함을 알 수 있다. 전압 제한원의 중심이 원점에 가깝게 이동함에 따라서 약계자 제어를 통하여 배터리를 충전할 수 있는 속도 영역이 넓어지게 되므로 한계풍속의 크기 또한 증가한다. 그림 8은 전압제한원의 중심 위치에 따른 한계풍속을 나타 낸 것이다. 발전기 인덕턴스의 크기가 1.755mH의 경우 약계자 제어를 통한 배터리 충전 한계 풍속은 12.5m/s 이다. 인덕턴스의 크기가 50% 증가하여 전압 제한원의 중심이 (-28.1,0)에 위치할 경우 약계자 제어를 통한 배터리 충전 한계 풍속은 12.5m/s에서 13.8m/s로 증가하며, 인덕턴스의 크기가 75% 증가하여 전압 제한원의 중심이 (-24,0)에 위치할 경우 약계자 제어를 통한 배터리 충전 한계 풍속은 12.5m/s에서 15.1m/s로 증가한다.

그림 7 출력 곡선의 기울기에 따른 한계 풍속

Fig. 7 Cut-off wind speed on according to slope of the output curve

그림 8 출력 곡선의 기울기에 따른 한계 풍속

Fig. 8 Cut-off wind speed on according to slope of the output curve

그림 9 인덕턴스 변화에 따른 전압 제한원 중심

Fig. 9 Migration of voltage limit circle center point in accordance with change of inductance

3. 결 론

본 논문에서는 스파이럴 블레이드로 구성된 독립형 소형 풍력 발전시스템에 PWM 컨버터를 사용하여 배터리 충전이 불가능한 과풍속 구간에서 배터리 충전 영역 확장을 위해 약제자 제어 적용 시, 약제자 제어를 적용하여도 배터리 충전이 불가능한 한계풍속을 수식을 통하여 분석하였다. 한계 풍속의 크기는 블레이드 출력 특성과 발전기 자속과 인덕턴스로 표현되는 전압 제한원 중심에 의하여 달라진다. 블레이드 출력 특성의 기울기가 가파를수록 한계 풍속이 증가하여 과풍속 구간에서 배터리 충전 가능 영역이 증가하게 되며, 블레이드 출력 특성의 기울기가 완만할수록 한계 풍속은 감소하여 과풍속 구간에서 배터리 충전 가능 영역은 감소한다. 또한 발전기 약제자 제어 시 전압 제한원의 중심이 원점에 가까워질수록 약제자 제어를 통해 배터리 충전이 가능

한 한계풍속을 증가시킬 수 있다. 따라서 PWM 컨버터를 사용하는 소형 풍력 발전시스템의 구성 시 블레이드의 출력 특성과 발전기 파라미터를 적절히 산정하여 설계를 한다면 약계자 제어를 통한 배터리 충전 영역을 확장시킬 수 있다. 또한, 한계풍속을 통하여 배터리 충전 전류 제어가 불가능한 풍속 영역을 예측할 수 있으므로 적절한 과풍속 방지 대책 및 시스템 보호 동작을 통하여 시스템 안전성을 향상시킬 수 있다. 한계풍속에 영향을 미치는 요인을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 정부재원(지역혁신 인력 양성 사업) 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No.2012026153)

References

- [1] J. Cace, E. ter Horst, K. Syngellakis, et al, Urban wind turbines:Guidelines for small wind turbines in the built environment, Wineur Intelligent Energy Europe, pp. 1-41, 2007.
- [2] 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.
- [3] Jae-Heung Kim, "A study on the battery charging algorithm for small-scale wind power generator using three phase PWM converter," Pusan National Univesity, 2013.
- [4] 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, 1996, pp. 62-65.
- [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] Jang-Mok Kim, Seung-Ki Sul,"Speed control of interior permanent magnet synchronous motor drive for the flux weakening operation," IEEE Trans. on Ind. Applicat., vol.33, Jan/Feb. 1997,pp.43-48.

저 자 소 개

구 현 근 (具賢根)

1984년 12월 11일생. 2009년 부산대 전자전기통신 공학부 졸업. 2009년~현재 동대학원 석·박사 통합과정

이 형 옥 (李炯旭)

1986년 1월 19일생. 2011년 부산대 전자전기공학부 졸업. 2014년 동 대학원 로봇관련협동과정 석사과정. 2014년 3월~현재 삼성중공업 연구원

김 장 목 (金長睦)

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