

소형 직접구동형 풍력발전기의 최대 출력제어

김철호, 이우석, 서영택, 오철수  
(주)서영테크, 부산정보대, 구미1대학, 경북대

Maximum Power Control of Small Direct-Drive Wind Power Generator

Chul-Ho Kim, Woo-Seok Lee, Young-Taek Seo, Chul-Soo Oh  
Seoyoung Tech, Busan College of Info., Kumi College, Kyungpook N. Univ.

**Abstract** - Research related to renewable energy is urgently required to cope with the depletion of fossil fuel and the environmental pollution. This paper deals with maximum power control of 1kW rating wind power generator. To implement direct-drive generator, axial flux permanent magnet generator is adopted to test the converter. The blade is attached to the surface of outer rotor disk.

Generally wind power generator is operated under the rated wind speed. To capture maximum power at any given wind speed, the coordination of generator and converter is essential. Buck/Boost converter is designed to charge 24V battery and under the low wind speed it operates as boost converter.

1. 서 론

화석연료에 대한 의존도가 큰 가운데, 원유가 상승, 대기 환경오염 등으로 대체에너지 개발에 대한 연구개발이 절실히 요구되고 있다. 본 연구에서는 1kW급 소형풍력발전기의 최대 출력제어를 다룬다.

풍력발전기는 축방향자속 영구자석(Axial Flux Permanent Magnet) 발전기이므로, 그 구조는 축방향 길이가 짧고, 반경방향이 상대적으로 큰 디스크 형태이다. 또한 축이 고정되어 있고, 디스크의 외부가 회전자로 동작한다. 따라서 프로펠러 블레이드를 디스크 회전자에 직접 부착하는 직접구동형(Direct Drive) 발전기를 구현할 수 있다. 블레이드에서 발전기 회전자로 이어지는 중간 동력변환 장치가 없기 때문에 에너지변환 효율이 상대적으로 높다.

풍력발전기는 바람의 특성상 정격풍속 이하에서 운전되는 시간이 많다. 따라서 정격풍속 이하의 바람에서 최대 출력(Maximum Energy Capture)을 얻기 위한 콘버터의 제어가 중요하다. Buck/Boost 콘버터는 24V 배터리 충전용으로 설계하였고, 낮은 풍속에서해서는 발전기의 정류전압이 배터리 단자 전압보다 낮으므로 Boost 콘버터로 동작하게 하여, 풍속이 상대적으로 낮은 영역에서도 충전이 가능하게 하였다.

2. 본 론

2.1 풍력발전의 개요

풍력발전 시스템에서 단위 면적당 공기 역학적 출력과 이로부터 회전자속에 얻어지는 이상적인 기계적 출력은 다음과 같다.

$$\frac{P}{A} = 0.59 \frac{1}{2} \rho v^3 \quad [kW / m^2] \quad (1)$$

$$\frac{P}{A} = C_p(\lambda) \frac{1}{2} \rho v^3 \quad [kW / m^2] \quad (2)$$

(1)식에서 공기밀도  $\rho$ 는 (1.25±0.04 kg/m<sup>3</sup>)의 실용값을 쓰는 것이 일반적이며, (2)식에서의 출력계수  $C_p(\lambda)$ 는 날개 단면의 형상에 의해 결정되며 그 최대값이 Betz 상수

인 0.59를 넘지 못하며 주속비( $\lambda$ )의 함수로 나타난다.

그림 1은 바람의 속도와 출력 곡선을 나타내는 그림으로 실제 풍력발전기에서는 일정속도 이상의 풍속이 되면 Blade의 Stall 혹은 Pitch제어에 의해 출력을 제한하여 발전기를 보호하고 있다.

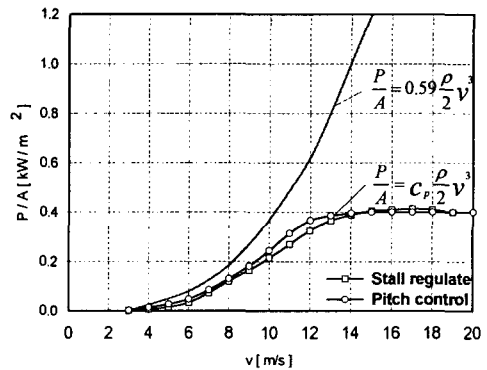


그림 1. 풍력 터빈에 의한 출력 곡선

2.2 직접 구동형 풍력발전기

직접구동이 가능한 AFPM 발전기를 개발하였으며, 소형 AFPM 발전기의 특징은 회전자(Rotor)와 고정자(Stator)가 Disc형태로 되어 공극에서의 자속 방향이 발전기의 기계축과 평행하게 형성되어 자기회로의 경로가 짧기 때문에 단위무게당 출력이 크고, 고에너지 밀도를 갖도록 설계할 수 있다.

발전기의 회전자가 외부에 있으므로 기어를 사용하지 않고 직접 날개를 부착하여 사용할 수 있다. 영구자석 재료로 고 에너지적의 Nd-Fe-B와 같은 희토류 영구자석 재료가 보급됨에 따라 비교적 큰 공극을 형성할 수 있게 되어, 코어리스(Coreless)형태로도 제작이 가능하게 되었다. 코어리스의 장점은 권선의 체적 밀도를 상대적으로 높게 설계할 수 있으며, 코킹 토크(Cogging Torque)에 의해 발생되어지는 손실을 줄일 수 있다.

직접구동형 풍력 발전기는 회전자의 속도영역이 저속이므로 다극이면서 발전기의 외경의 크기가 커지므로 설계시 이를 충분히 고려해야 한다.

2.3 DC/DC Converter (Buck/Boost)

그림 2는 다이오드 정류자형 Buck-Boost converter를 나타내고 있다. Buck-Boost 컨버터의 회로에서 L과 다이오드 위치를 바꾼 회로이다. Buck, Boost 컨버터와의 달리 출력전압의 극성은 음(Negative)으로 입력전원과 반대이다. Buck-Boost 컨버터는 정류전압  $V_d$ 보다 출력

전압  $V_{d2}$ 을 높게 하거나 낮게 할 수 있다. 영구자석형 풍력 발전기의 운전 영역에서 저속 또는 고속 운전시 정류 전압을 Duty ratio에 따라서 일정 출력 전압을 만들 수 있다. DC/DC Buck-Boost 컨버터에서 입력전압  $V_{d1}$ 과 출력전압  $V_{d2}$ 의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{V_{d2}}{V_{d1}} = \frac{\delta}{(1-\delta)} \quad (3)$$

$\delta$ 를 변경시킴에 따라 출력전압을 0에서 이론적으로  $\infty$ 까지 제어할 수 있다.

$\delta > 0.5$ : 평균출력 전압  $V_{d2}$ 이 직류 입력전압 보다 크다.  
 $\delta < 0.5$ : 평균출력 전압  $V_{d2}$ 이 직류 입력전압 보다 작다.

DC/DC 컨버터의 입력 전력은 다음과 같다.

$$P_{input} = V_{d1} I_{d1} \frac{\delta}{(1-\delta)} \quad (4)$$

발전기의 인덕턴스를 무시한다면, 정류 전압  $V_{d1}$ 는 바람의 속도에 비례하므로 식(5) 와 같다.

$$V_{d1} = V_{d1max} \left( \frac{w}{w_{nom}} \right) \quad (5)$$

$w$ 는 바람의 속도를 나타내고,  $w_{nom}$ 는 터빈의 nominal 상태의 바람의 속도이다  
 위식을 이용해서 다음과 같이 DC-DC 컨버터의 입력 전력을 나타낼 수 있다.

$$P_{input} = P_{nom} \left( \frac{w}{w_{nom}} \right)^3 \frac{\delta}{(1-\delta)} \quad (6)$$

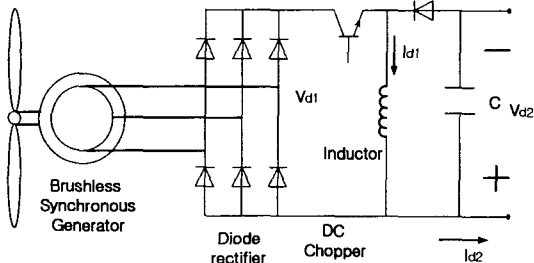


그림 2. 소형풍력발전기 Buck-Boost Converter 회로

#### 2.4 시제품 제작 및 결과고찰

본 연구를 수행하기 위해 1kW급 AFPM 발전기로 구성된 Prototype 풍력발전 시스템을 구성하였으며 이 풍력발전 시스템을 이용하여 발생된 전력을 실제 활용하기 위한 전력 저장용 충전장치를 설계하고 제작하여 각종 특성 실험을 수행하였다.

그림 3은 풍력 발전기의 전력 변환 제어 알고리즘을 나타내고 있다. 발전기 입력 전압과 전류 및 속도를 측정하여 발전기의 회전 속도가 낮은 영역(6m/s)에서도 Buck-Boost converter에서 Duty ratio의 크기를 제어하여 최적의 Peak Power를 Battery에 저장한다.

또한 Buck/Boost 컨버터는 발전기에서 발생한 가변 정류전압을 일정 출력전압으로 변환함으로써 풍력 발전기의 가변속에 따른 출력의 크기를 Duty 비의 변화에 의해서 일정 출력을 Battery로 충전함으로써 넓은 속도 영역에서 Peak Power가 DC-DC Converter를 통해 최적의 에너지 저장 능력을 가지므로 효율이 높다..

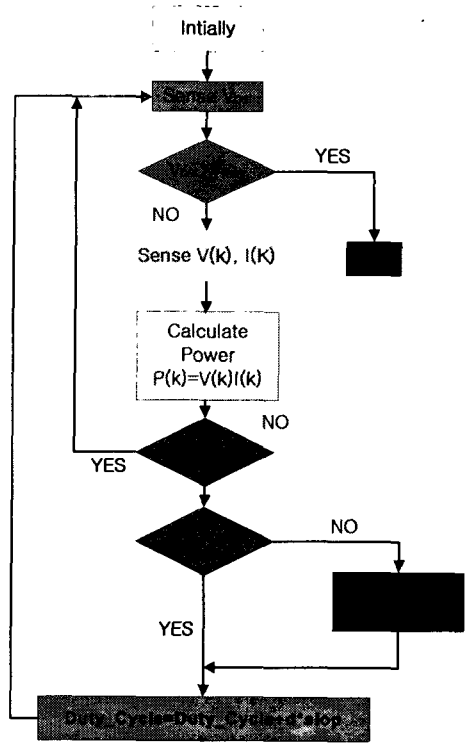


그림 3. 전력 변환 제어 알고리즘

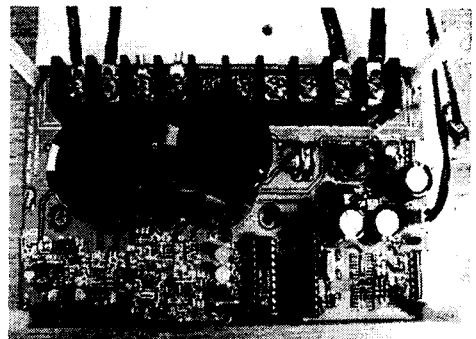


그림 4. AFPM 풍력 발전용 1.5kW DC-DC컨버터 시제품

그림 4는 본 연구에서 개발한 소형 풍력 발전용 24V 배터리 충전용 1.5kW용 DC-DC컨버터 시제품을 나타내고 있다. 부하 실험을 통하여 Buck-Boost Converter와 발전기의 특성을 알 수 있었다.

표 1은 부하 실험을 통해서 측정된 풍력 발전용 DC-DC Converter 사양을 나타내고 있다.

그림 5는 발전기의 정류 출력전압의 크기에 따라서 제이트의 PWM Duty ratio 제어에 의한 컨버터 효율을 나타낸다. 컨버터의 효율은 0.5 Duty ratio에 대해서 최대이고, 발전기 입력 전압과 전류 및 속도를 측정하여 발전기의 회전속도가 낮은 영역에서도 Buck-Boost converter에 의해 Duty ratio의 크기를 제어 일정 출력전압 발생한다.

표1. 풍력 발전용 DC-DC Converter 사양

Converter type	Buck/Boost
Output power	Max 1.5kW
Input Voltage	12 - 48V
Output Voltage	24 - 28V
Duty ratio	0.2 - 0.8
Gate drive	PWM
Start-up Wind speed	6m/s
Peak power	1kW (12m/s)

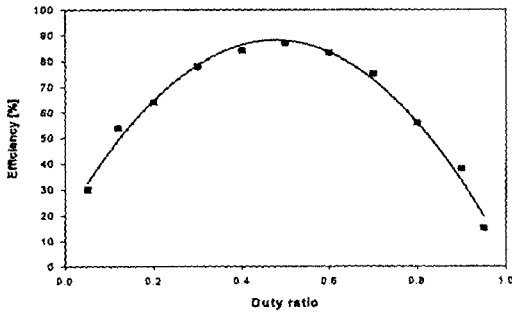


그림 5. Buck-Boost converter의 duty ratio에 대한 효율

그림 6은 풍력 발전기의 출력전압과 전류 및 속도를 측정하여 게이트의 Duty ratio의 크기를 0.1~0.9 변화시 각 입력 전압과 발전기 속도에 따른 Peak power에 대응하는 Duty 비를 측정된 그래프이다. 발전기의 회전 속도가 낮은 풍속 6m/s 영역에서도 Buck-Boost converter에서 입력 전압을 step up 동작모드를 실행함으로써 Peak Power를 Battery에 저장하였다. DC-DC Converter의 제어방식의 알고리즘은 풍력 발전기의 가변속에 따른 출력의 크기를 Duty 비의 변화에 의해서 일정 출력을 Battery 충전함으로써 넓은 속도 영역에서 Peak Power Checking을 구현 할 수 있었다.

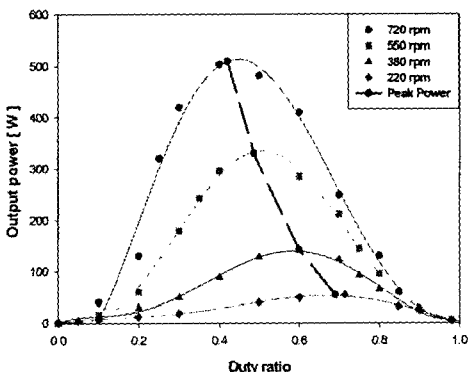


그림 6. Buck-Boost converter의 duty ratio에 대한 최대출력

그림 7은 본 연구의 실증실험용 풍력발전 시스템으로 Prototype AFPM 풍력발전기와 Whisper H80 모델의 Blade를 3개 사용하였다.



그림 7. 직접 구동형 풍력 발전-실증실험

### 3. 결 론

본 논문은 독립형 풍력발전의 효율적인 에너지 변환 장치에 관한 것으로, AFPM 풍력발전기 시스템에 적용 시 보다 향상된 특성을 가지도록 하는데 목적을 두었다.

소형 풍력발전에 이용되는 고효율 충전장치 개발로 인해 직접구동형 발전기의 출력은 입력전압과 전류 및 속도를 측정하여 발전기의 회전속도가 낮은 영역에서도 Buck-Boost Converter에서 Duty ratio의 크기를 제어하여 최적의 Peak Power로 배터리에 저장된다.

DC-DC Converter의 제어 알고리즘은 풍력 발전기의 가변속에 따른 출력의 크기를 Duty 비의 변화에 의해서 일정출력을 Battery 충전함으로써 넓은 속도 영역에서 Peak Power Checking을 구현할 수 있다.

### (참 고 문 헌)

- [1] R. David Richardson, Gerald M. Mcnerney, "Wind Energy Systems," Proceedings of the IEEE, Vol. 81, No. 3, pp.378-388, March 1993.
- [2] E. Muljadi, H.E. McKenna, "Power quality issues in a hybrid power system", Industry Applications, IEEE Transactions on, Volume 38, Issue 3, pp. 808 809 May/June 2002.
- [3] B.J. Chalmers, E. Spooner, "An axial flux permanent magnet generator for a gearless wind energy system", Energy Conversion, IEEE Transactions on, Volume 14, Issue 2 , pp. 251 257 Jun 1999.
- [4] 김철호, 공정식, 오철수, "가변속과 일정속 풍력발전시스템의 출력제어", 한국에너지공학회지, 제9권, 2호, 2000. 9.