

계통연계형 직렬운전 소형풍력발전시스템의 해석 및 운전방안 연구

김창하¹, 구현근¹, 손영득¹, 김장목[†]

The Analysis and Study on Operation Strategy of Grid-connected Series Small Wind Turbine System

Chang-Ha Kim¹, Hyun-Keun Ku¹, Yung-Deug Son¹, and Jang-Mok Kim[†]

Abstract

This paper proposes an analysis and operation strategy of a grid-connected wind turbine system using a diode rectifier. The currents of generators are the same as that of a small wind turbine system. Therefore, the analysis of generator torque is required as opposed to an analysis of blade speed. In this paper, the appropriate MPPT control method is proposed to control generator torque. Usefulness of the proposed operation strategy is verified by simulations and experiments.

Key words: Grid connected small wind power generating system, Series operation, H-bridge inverter, Single phase grid

1. 서 론

최근 산업이 발전하면서 에너지사용의 증가로 환경오염과 자연고갈문제가 대두되고 있으며, 이 문제의 해결책으로 신재생에너지를 이용한 발전시스템이 큰 관심을 받고 있는 추세이다. 이중 풍력 발전 시스템은 바람이 가지는 운동에너지를 전기에너지로 변환하는 대표적인 신재생에너지 시스템이다. 블레이드 크기와 발전기 용량에 따라 대형과 소형으로 분류 할 수 있는데, 소형풍력 발전은 반영구적 발전이 가능한 형태이며, 크기가 비교적 작고 설치가 용이해 초고층 건물이나 공원 등에 설치가 가능하다^[1]. 일반적으로 소형풍력발전은 출력전압이 낮아 계통연계형 보다는 배터리 충전 등 독립 형으로 주로 사용된다. 그러나 N개의 발전기를 직렬로 연결하여 출력전압을 높이면 계통연계가 가능하다. 발전기를 직렬로 연결하는 경우 각 발전기에서 DC단으로 들어가는 전류가 모두 같기 때문에 전체 출력 파워를 구하기 위해서

발전기의 토크를 기준으로 해석해야 한다. 따라서 본 논문에서는 계통연계형 소형풍력발전 직렬운전에 대한 해석과 이에 적합한 계통과위의 최대점을 추종하는 MPPT 기법을 제안한다. 제안하는 소형풍력 발전 직렬운전 시스템은 소형 블레이드, 영구자석 동기발전기(PMSG), 3상 다이오드 정류기, H-Bridge 인버터를 사용하여 단상 계통연계 하였다. 직렬운전에 대한 해석과 제안한 MPPT는 시뮬레이션과 실험을 통해서 확인하였고, 개별 운전과 직렬운전을 비교 정리하였다^[2].

2. 일반운전 소형 풍력 발전 시스템

일반적인 소형 풍력 발전시스템의 블레이드 출력 특성은 바람의 에너지 식(1)와 블레이드가 획득 가능한 에너지 출력 계수인 C_p 를 통하여 나타낸다. 블레이드 종류에 따른 정확한 C_p 값은 수치해석을 통하여 획득 가능하다. 이를 통해 얻은 블레이드 출력 중에서 가장 높은 값을 찾는 것이 MPPT(Maximum Power Point Tracking)이라 한다^[3,5].

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

P_{blade} : 블레이드 파워, ρ : 공기밀도, A : 면적, V : 풍속

Paper number: TKPE-2015-20-1-8

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

Manuscript received Oct. 1, 2014; accepted Dec. 12, 2014

— 본 논문은 2014년 전력전자학술대회 우수추천논문임

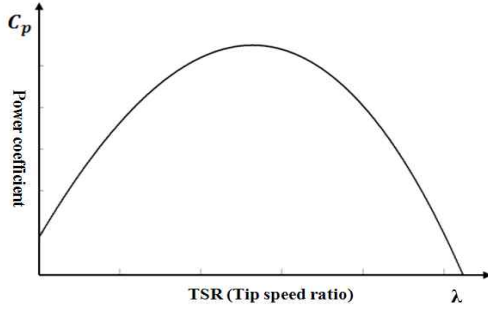


Fig. 1. Power coefficient versus tip speed ratio.

2.1 출력계수

출력계수(Power Coefficient, C_p)는 풍력터빈이 바람 에너지로부터 추출 가능한 파워 회수율을 말하며 이 출력계수가 높을수록 동일한 풍속에서 많은 에너지를 얻을 수 있는 것을 뜻한다.

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

P_{blade} : 실제 얻은 출력 [Nm/s or $W, kgm^2/s^3$]

출력계수(C_p)는 풍속에 대한 블레이드의 회전 속도비인 주속비(TSR: Tip Speed Ratio) λ 의 함수로 표현되고, 수치해석을 통해 아래의 식(3)로 표현된다.

$$C_p = C_0 + C_1 e^{C_2 \left(\frac{\lambda - C_3}{C_4} \right)^2} \quad (3)$$

$\lambda = \frac{Rw_m}{V}$: 주속비

R : 블레이드 반지름, w_m : 블레이드 속도

C_0, C_1, C_2, C_3, C_4 의 파라미터는 각각 Y축 이동, 최대값 조절, 기울기 조절, X축 이동, 기울기 조절에 영향을 미치는 파라미터이다^[4]. 실험에 이용된 블레이드의 주속비에 대한 출력특성 그래프는 그림1과 같다.

2.2 개별 소형풍력발전 시스템의 MPPT

개별 운전은 출력계수 특성에 의해 최대지점이 나타나게 되며, 그림 2와 같이 각 해당 풍속의 최대 블레이드 파워 지점을 찾아 제어하는 방식이 MPPT이다^[3,5].

3. 직렬운전 소형 풍력 발전 시스템

소형풍력발전 시스템 직렬운전은 부스터 컨버터나 변압기 없이 역기전압이 낮은 소형풍력 발전기들의 출력을 직렬로 연결해 DC단 전압을 승압하여 계통연계가 가능하고, 인버터 1대로 N개의 발전기 출력을 전달 할 수 있다.

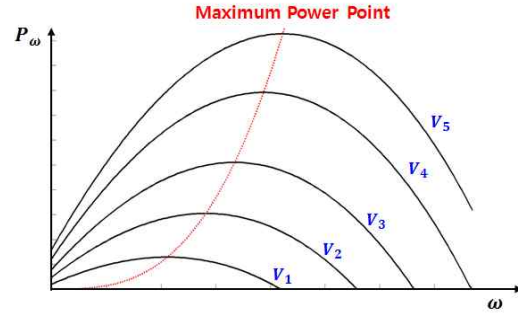


Fig. 2. Power versus angular velocity according to the change of wind speed.

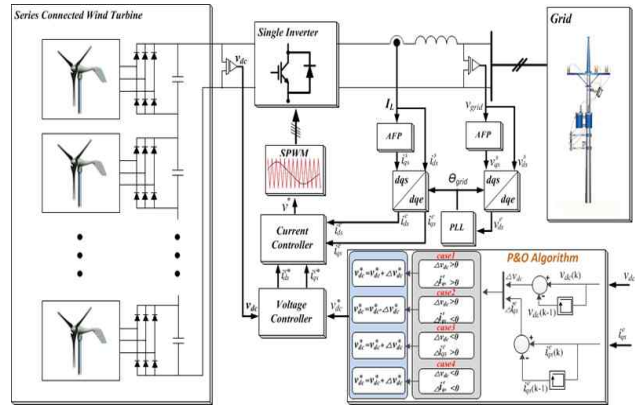


Fig. 3. Series connected small wind turbine system control block diagram.

3.1 직렬운전의 특성

직렬연결은 다이오드 정류기 출력의 DC단을 공유하기 때문에 N개의 블레이드가 각기 다른 풍속조건에서 운전 하여도 출력되는 전류는 같다. 그러므로 각 발전기의 토크역시 모두 같다. 따라서 각기 다른 풍속조건에서 직렬운전의 개별 블레이드들은 속도와 주속비가 일치 하지 않는다. 그렇기 때문에 블레이드의 출력은 기본의 속도에 대한 해석이 아닌 발전기의 토크로 해석해야한다.

직렬운전 N개의 블레이드 파워의 합은 식(2)와 식(3)으로부터 식(4)와 같이 토크에 관한 식으로 표현 가능하다. 순시 적으로 n개의 블레이드 토크는 같으므로 식(5)와 같이 전체 블레이드의 합은 토크와 해당 블레이드의 풍속의 합으로 나타 낼 수 있다.

$$P_n = \frac{T \times V_n}{R} \left(C_3 \pm C_4 \sqrt{\frac{1}{C_2} \ln \left(\frac{C_p - C_0}{C_1} \right)} \right) \quad (4)$$

$$P_{total} = \sum_{n=1}^n \left[\frac{T \times V_n}{R} \left(C_3 \pm C_4 \sqrt{\frac{1}{C_2} \ln \left(\frac{C_p - C_0}{C_1} \right)} \right) \right] \quad (5)$$

T = 토크, V_n = n번블레이드의 풍속

3.2 직렬운전의 MPPT

서로 다른 풍속으로 N개의 블레이드를 운전 한 경우

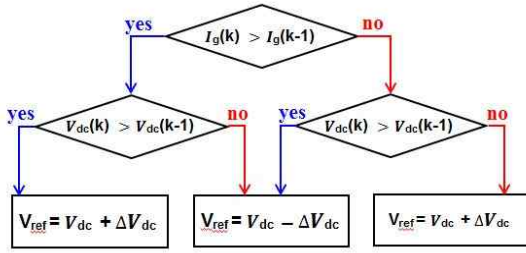


Fig. 4. Proposed algorithm.

각 발전기의 토크는 같지만 주속비는 다르다. 그러므로 각 블레이드 마다 최대 개별파워를 추종할 수 없고, 주속 비에 대한 전체 파워도 구할 수 없다. 따라서 직렬운전 시 N개의 블레이드 최대지점을 추종하기 위해서는 발전기 토크를 제어해야한다. 다이오드 정류기 사용 시 발전기 측 토크를 직접 제어하기가 힘들기 때문에 DC 단 전압의 가변제어를 통해서 출력계수 특성에 따라 토크와 부하단의 최대파워를 추종하는 MPPT를 제안한다.

3.3 제안한 직렬운전 MPPT 알고리즘

식(6)를 보면 DC단 전압을 가변하면 발전기 속도를 변화시킬 수 있고, 식(7)과 출력계수 특성에 의해 토크를 제어할 수 있다.

$$E = K_e w_m \quad (6)$$

$$E = \text{역기전력}, K_e = \text{역기전력 상수}, w_m = \text{블레이드 각속도} \quad (24)$$

$$P_{blade} = T w_m \quad (7)$$

계통전압은 일정하므로 DC전압을 가변하여 계통전압의 최대점을 찾는 P&O알고리즘을 그림4와 같이 제안한다^[6]. 그림에서 I_g 는 계통전류이고, V_{dc} 는 DC단전압, V_{ref} 는 전압제어 지령을 뜻한다.

4. 시뮬레이션

시뮬레이션은 Matlab Simulink를 이용하여 실험 조건과 동일하게 풍속 9.5m/에서 약 100W의 블레이드 파워가 출력되도록 블레이드 시뮬레이터를 설계하였으며 이러한 블레이드의 출력 파워 곡선은 그림 5와 같다.

8m/s, 7.5m/s, 7m/s의 풍속을 가지는 블레이드 시뮬레이터 3개를 직렬연결 하였고, 단상계통을 10:1 (22Vrms)로 낮추어 시뮬레이션 하였다. 그림 6(a)는 DC단 전압에 대한 계통파워를 보여주고 있으며, DC단 전압을 260V부터 40V까지 전압제어 하였다. C_p 에 의해 최대파워 나타나게 되며 DC전압 160V에서 계통파워가 최대가 되는 것을 볼 수 있다. 그림 6(b)는 DC단 전압에 대한 발전기 토크를 보여주고 있으며, 3개의 발전기의 토크가 240V부터 100V까지는 같은 토크를 내는 것을 확인할

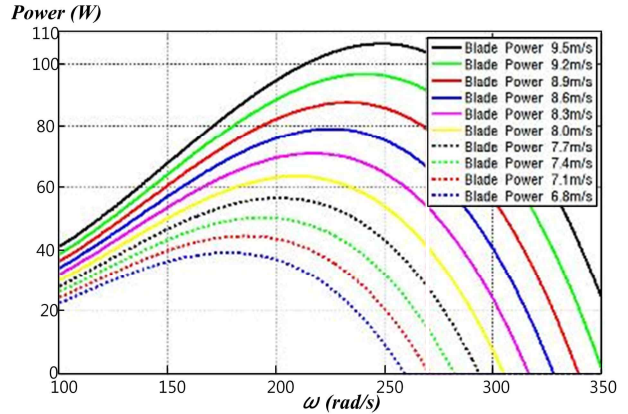
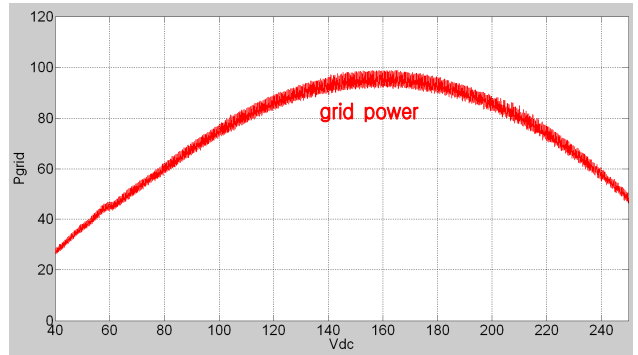
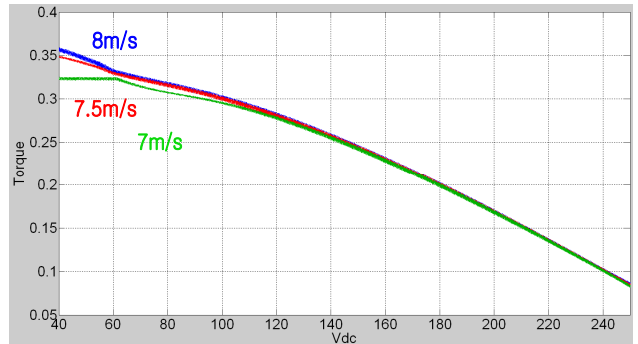


Fig. 5. Blade power curve of designed wind turbine by wind speed.



(a) dc-voltage versus grid power

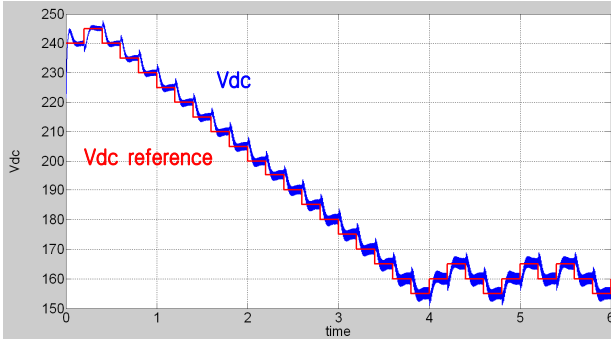


(b) DC-voltage versus generator-torque

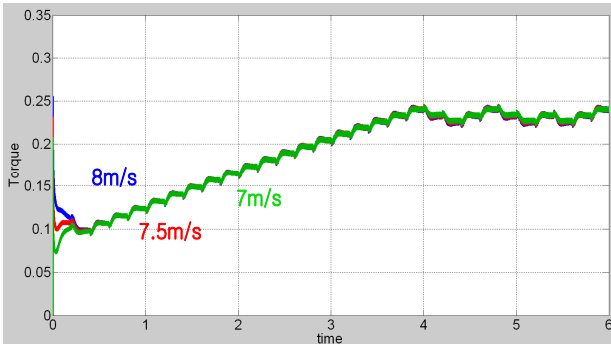
Fig. 6. Series connected wind turbine simulation according to dc-voltage.

수 있었고, 100V아래의 전압제어 영역에서 7m/s 풍속을 가지는 발전기의 파워는 8m/s와 7.5m/s가 낼수 있는 파워보다 낮다. 토크를 계속 올릴수록 높은 부하가 걸리게 되는데 이러한 부하에 해당하는 전력을 낼 수 없어 더 이상 토크가 증가되지 못하고 한계에 부딪힌다. 하지만 3개의 발전기가 모두 같은 토크영역에서 최대 전력을 낼 수 있으므로 본 논문에서 적용한 MPPT 제어는 모두 같은 토크영역에서 사용하였다.

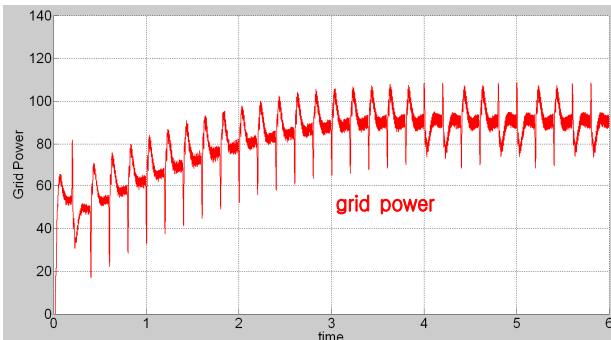
그림 7은 그림 6과 같은 조건에서 MPPT 알고리즘을 적용하였으며, MPPT 알고리즘으로는 DC단 전압을 가변 제어하여 계통으로 들어가는 전류의 최대 점을 찾는



(a) dc-voltage



(b) Torque



(c) Grid power

Fig. 7. Series connected wind turbine simulation using MPPT algorithm.

P&O알고리즘을 적용하였다. 시뮬레이션 시간은 6초이며 10kHz의 스위칭 주파수로 제어한다. 전압제어가 충분히 정상상태에 도달할 수 있도록 0.2초마다 전압지령을 가변하였고, 그림 7과 같은 결과를 알 수 있다. 그림 7(a)는 계통의 최대파워를 찾을 때까지 DC단 전압을 가변하여 제어하고 있으며, 시뮬레이션 시간 4초에서 165V~155V부근에서 제어되며, 그림 7(c)에서는 4초에 계통파워가 최대지점에 도달 하였다. 그림 7(b)를 보면 DC단 전압을 가변하여 발전기의 토크를 제어할 수 있는 것을 보여준다. 그림 6(b)를 보면 최대파워 지점의 전압인 160V에서 0.235N·m의 토크를 가지는 것을 볼 수 있고, 그림 7(b)에서 토크가 0.235N·m부근에서 제어 되는 것을 볼 수 있다.

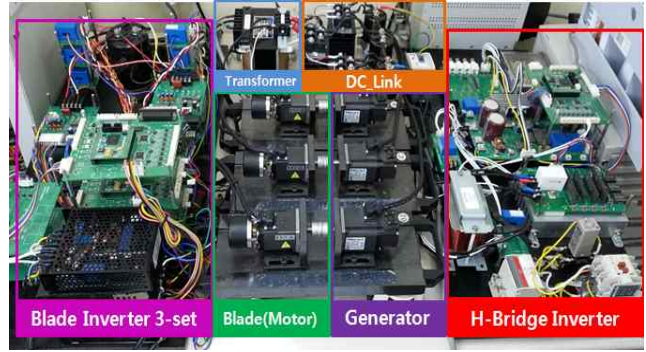


Fig. 8. Experimental equipment for series wind turbine system.

TABLE I
EXPERIMENTAL CONDITIONS

<i>Wind Turbine Simulator</i>	
Rated Output Power	100[W]
Rated Wind Speed	9.8[m/s]
Rated Speed	248.8[rad/s]
Air Density	1.255[kg/m ³]
Maximum Coefficient(C_p)	0.3188
Radius	0.45[m]
<i>Generator(PMSG)</i>	
Rated Output Power	100[W]
Rated Speed	3000[rpm]
Maximum Speed	5000[rpm]
Rated Torque	0.32 N·m
Voltage Constance K_e	0.2132
Pole pair	3
R_s	24.36 [Ω]
L_s	19.82 [mH]

DC단 전압의 제어를 통해 토크를 제어할 수 있는 것을 시뮬레이션으로 확인하였고, 최대 계통 파워를 추종할 수 있는지 확인하였다.

5. 실험

개별운전과 직렬운전에서의 성능을 비교·분석하기 위하여 3가지 서로 다른 풍속조건에서 실험하였으며 본 논문에서 사용한 실험의 전체시스템은 그림 8과 같다. 정격속도 3000rpm, 정격 출력 100W의 Servo Motor 두대를 결합하여 M/G 3세트를 구성하였다. M/G 세트 중 Motor의 경우 블레이드 출력 특성을 그림 5와 같이 모터에 부여하여 풍속에 따른 출력을 내도록 제어하였고, 변압기를 통하여 실제 단상계통전압 220V를 10배 낮추어 축소 모델로 실험하였다. 실험 조건 및 파라미터는 표 1과 같다.

직렬운전은 발전기의 토크가 같기 때문에 발전기에서 다이오드로 흐르는 전류의 크기는 모두 같다. 그림 9

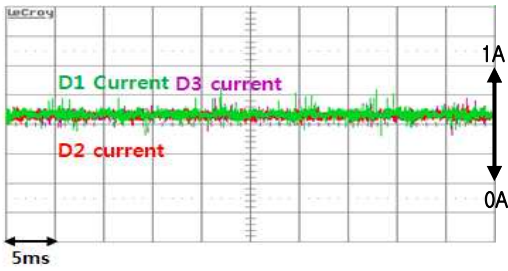
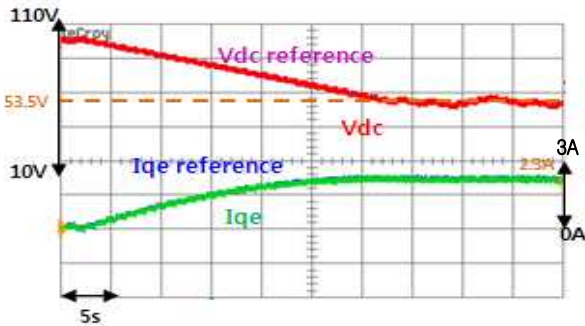
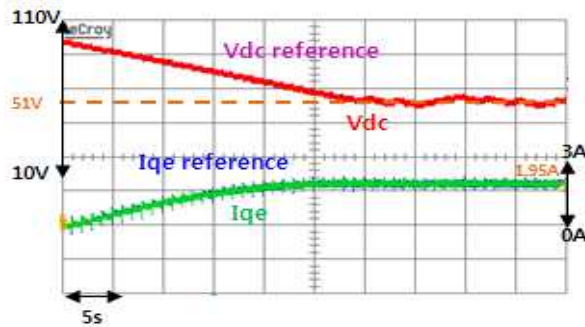


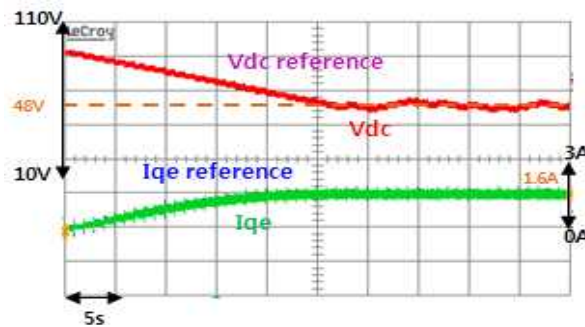
Fig. 9. Current of individual diode rectifier.



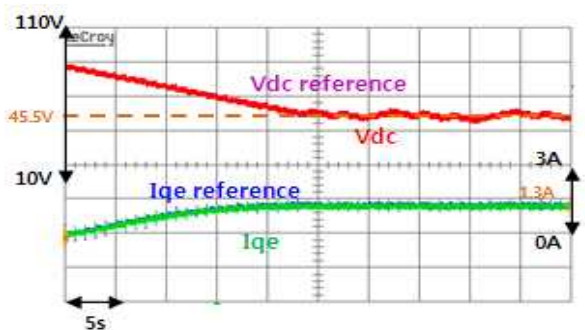
(a) MPPT operation of 8m/s



(b) MPPT operation of 7.5m/s

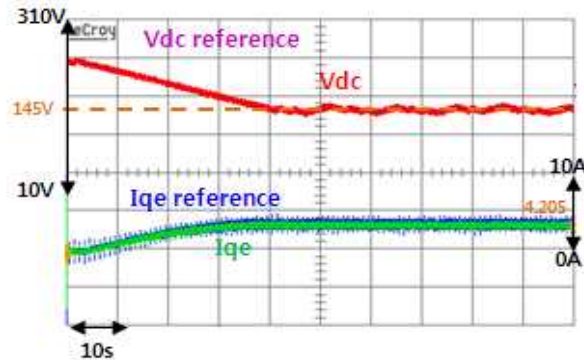


(c) MPPT operation of 7m/s

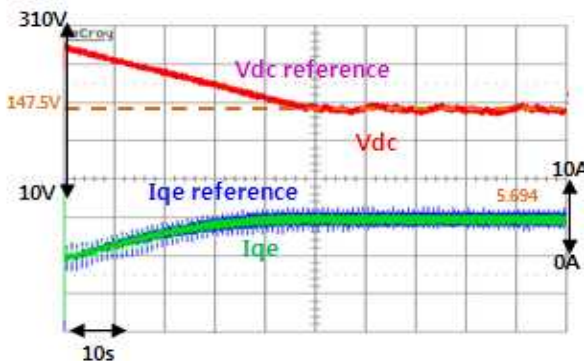


(d) MPPT operation of 6m/s

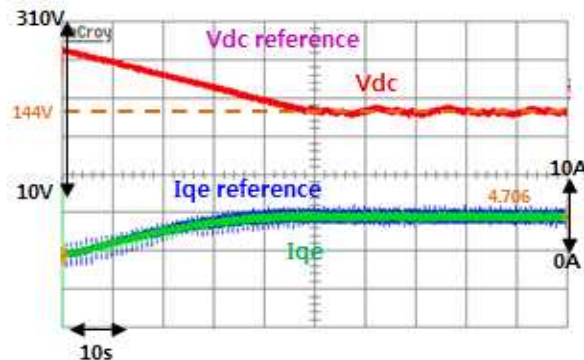
Fig. 10. MPPT operation of Individual wind velocity.



(a) Series MPPT operation of 8, 7, 6m/s



(b) Series MPPT operation of 8, 7.5, 7m/s



(c) Series MPPT operation of 7, 7, 7m/s

Fig. 11. MPPT operation of series connected wind turbine.

를 보면 실험에서 다이오드 정류기에 흐르는 전류가 모두 같음을 확인할 수 있다.

그림 10은 3개의 블레이드 직렬운전과 비교하기 위해 개별운전 실험한 것이다. 8m/s, 7.5m/s, 7m/s, 6m/s의 풍속으로 개별 운전 실험 하였고 그림과 같이 DC단 전압을 가변 하여 계통전류의 크기를 MPPT 하였다. 실험에서 Vdc는 DC단 전압을 나타내며, Iqe는 계통 q축 전류를 나타낸다.

그림 11은 그림 10에서 얻은 결과와 비교하기 위한 직렬운전의 결과이다. 그림 11(a)는 최대풍속과 최소풍

TABLE II
EXPERIMENTAL RESULTS

		Case 1	Case 2	Case 3
Wind Speed (m/s)	V_1	8	8	7
	V_2	7	7.5	7
	V_3	6	7	7
Individual operation (W)	P_{grid_V1}	36.92	36.92	25.7
	P_{grid_V2}	25.7	31.32	25.7
	P_{grid_V3}	16.4	25.7	25.7
	P_{grid_total}	79.02	93.94	77.1
series operation (W)	P_{grid_series}	69.2	88.22	75.3
efficiency η (%)		87.6	94	97.6

속의 차가 2m/s인 8, 7, 6m/s의 풍속으로 3직렬 MPPT 운전한 것이고, DC단 전압을 가변 하여 최대 계통전류를 추종하는 것을 보여준다. 그림 11(b)는 최대풍속과 최소풍속의 차가 1m/s인 8, 7.5, 7m/s의 풍속으로 실험하였고, 11(c)는 모두 같은 풍속인 7, 7, 7m/s의 풍속으로 실험하였다.

개별운전과 직렬운전의 발전량을 표2에 비교하였다. Case1의 최대 최소 풍속차가 2m/s인 경우의 효율은 가장 낮으며, Case3과 같이 동일한 풍속일 경우에 가장 높은 효율을 가진다. 풍속차가 작을수록 더 고효율의 계통연계 발전이 가능함을 검증하였다.

6. 결 론

본 논문에서는 소형풍력발전 직렬운전의 해석과 이에 적합한 MPPT운전 방법을 제안하였다. 직렬운전은 각 발전기의 전류가 같으므로 블레이드의 속도해석을 통한 발전기 출력의 해석이 아닌 발전기의 토크를 통한 발전기 출력의 해석을 실시하였다. 다이오드 정류기를 사용하기 때문에 토크를 직접제어 할 수 없어 DC단 전압제어를 이용한 계통전류의 크기를 P&O기법을 통해 MPPT 제어를 수행하였다. 이에 대한 결과를 시뮬레이션 및 실험을 통하여 확인하였고, 직렬운전을 개별운전과 비교한 분석으로 직렬운전에서 N개의 블레이드의 풍속의 차이에 따른 효율을 확인하였고, 1m/s이내의 풍속 차이에서 94%이상의 효율을 나타내는 것을 검증하였다.

이 논문(저서)은 2012년 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임. (NRF-2012H1B8A2026153)

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] 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] K. Y. Lo and Y. M. Chen, "MPPT battery charger for stand-alone wind power system," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 26, pp. 1631-1638, 2011.
- [4] H. K. Ku, H. U. Lee, and J. M. Kim, "A study on cut-off wind speed of small-scale wind generation system for battery charging," *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 63, No. 4, pp. 484-489, 2014.
- [5] E. Koutroulis and K. 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, Apr. 2006.
- [6] C. Xu, J. M. Lee, M. G. Park, J. D. La, and Y. S. Kim, "A new MPPT control by changing the DC-link voltage in a grid connected inverter-based wind power generation system," *The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 10, No. 12, pp. 1165-1166, Jul. 2013.



김창하(金昶河)

1989년 1월 4일생. 2013년 부산대 전자전기공학부 졸업. 2013년~현재 동 대학원 석사과정.



구현근(具賢根)

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



손영득(孫榮得)

1971년 12월 31일생. 1997년 한국해양대 제어계측공학과 졸업. 1998년 동경공업대학 교환연구생. 2001년 Kobe University of Mercantile Ocean Electro-Mechanical 졸업(석사). 2001년~2009년 현대중공업 선임연구원. 2010년~현재 부산대 전자전기공학부 박사과정. 기술사.



김장목(金長睦)

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