

# SMR을 갖는 소형풍력발전시스템의 센서리스 MPPT제어

## Sensorless MPPT Control for a Small-scale Wind Power Generation System with a Switched-mode Rectifier(SMR)

허성덕\* · 이준민\* · 김영석†  
 (Chengde Xu · Joon-Min Lee · Young-Seok Kim)

**Abstract** - A small-scale wind power generation system with a switched-mode rectifier(SMR) is proposed. To simplify the converter circuit of the wind power generation system, the synchronous inductors of the permanent magnet synchronous generator(PMSG) replace the inductor for the boost converter. The sensorless maximum power point tracking(MPPT) control is carried out for the wind power generation system with the SMR. The proposed system is verified through the simulations and the experiments.

**Key Words** : Small-scale, Wind power generation system, PMSG, SMR, MPPT, Inverter

### 1. 서론

석유, 석탄 등 화석연료의 사용은 오늘날 지구 온난화, 기후문제 등 심각한 환경문제와 자원의 고갈 문제를 초래하였고 이로 인해 신재생에너지에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 신재생에너지의 종류로 풍력, 조류, 태양광 등을 이용한 발전시스템이 대표적으로 연구되고 있고 그 중에서 풍력 발전에너지는 청정에너지인 바람을 이용하여 발전비용이 저렴하여 기존 화석연료를 대체할 수 있는 효과적인 에너지원으로 알려져 있다[1].

현재 풍력발전시스템은 주로 Back-to-back시스템(그림 1)과 DC-DC 컨버터 시스템(그림 2)에 대해 연구가 진행되고 있다[2-3]. Back-to-back 컨버터시스템에서 발전기 측 컨버터에서는 발전기의 속도제어를 통하여 최대 전력점 추종제어(MPPT) 수행하게 되고 계통측 컨버터에서는 전류제어를 통하여 계통전압과 전류의 위상을 제어하게 된다. 이 시스템은 제어성능이 좋고 시스템을 대용량으로 할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 발전기 측에 6개의 스위치가 필요하고 복잡한 제어를 요구하는 단점이 있다. 더구나 소형 풍력발전시스템에서 가격적인 부담이 커지게 되어 소형 시스템에 적용하기에는 적합하지 않다. DC-DC 컨버터 시스템에서는 주로 boost converter를 사용하고 있고 boost converter의 스위치 제어를 통하여 발전기의 속도를 제어하게 되고 이로써 MPPT제어를 수행하게 된다. 이 시스템은 많은 수동소자를 필요로 하고 있어 시스템의 부피가 커지고 가격이 상승하게 되는 단점이 있다.

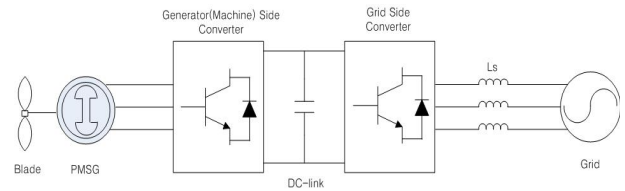


그림 1 Back-to-Back 컨버터를 이용한 풍력발전시스템  
 Fig. 1 Wind power generation system with back-to-Back converter System

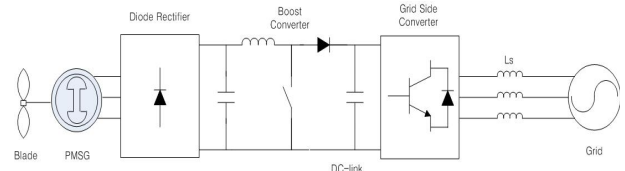


그림 2 Boost 컨버터를 이용한 풍력발전시스템  
 Fig. 2 Wind power generation system with boost Converter System

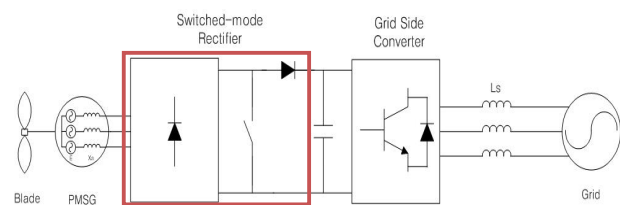


그림 3 PMSG와 SMR를 이용한 풍력발전시스템  
 Fig. 3 Wind power generation system with SMR

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Inha University, Korea

E-mail : youngsk@inha.ac.kr

\* Dept. of Electrical Engineering, Inha University, Korea

Received : October 4, 2013; Accepted : November 17, 2013

본 논문에서는 영구자석동기발전기의 동기 임피던스를 이용하여 삼상 부스터형 SMR시스템을 제안하고 있다.(그림 3) 제안한 시스템의 구성은 영구자석동기발전기, Switched-mode Rectifier(SMR), 계통 연계 형 삼상 인버터로 이루어

저있다. 영구자석동기발전기의 동기임피던스는 기존의 boost converter 시스템에서 인덕터를 대체할 수 있어 부스트 효과를 낼 수 있다. 본 시스템은 SMR회로를 사용하여 기존의 부스트 회로와 같은 동작을 수행할 수 있고 수동소자의 제거로 시스템의 가격과 부피를 줄일 수 있다. 또한 센서리스 MPPT제어를 사용함으로써 센서의 가격적인 부담을 줄일 수 있어 경제적이고 효율적인 시스템이다.

## 2. 본 론

### 2.1 풍력 터빈 모델

풍력에너지를로부터 블레이드에서 얻을 수 있는 전력  $P_{blade}$  는 상수와 풍속 그리고 블레이드의 효율계수로 정의할 수 있다.

$$P_{blade} = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) v_{wind}^3 \quad (1)$$

여기서 효율계수인  $C_p$ 는 주속비(TSR)  $\lambda$ 와 피치각  $\beta$ 의 함수이고 주속비는 식 (2)와 같이 정의된다.

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega_{blade}}{v_{wind}} \quad (2)$$

식 (1)(2)에서  $A$ 는 블레이드의 회전 단면적[m<sup>2</sup>],  $\rho$ 는 공기의 밀도(1.225[kg/m<sup>3</sup>]),  $C_p(\lambda, \beta)$ 는 출력계수,  $v_{wind}$ 는 풍속[m/sec],  $R$ 은 터빈의 반지름[m],  $\omega_{blade}$ 는 발전기의 회전속도[rpm]이다. 파워계수  $C_p(\lambda, \beta)$ 는 터빈이 받아들인 에너지 대 풍력에너지를의 비율을 의미한다.  $C_p(\lambda, \beta)$ 의 값은 주속비  $\lambda$ 의 함수식으로 식(3)과 같이 근사화 하였다.

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left( \frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{\lambda_i}} + C_6 \lambda \quad (3)$$

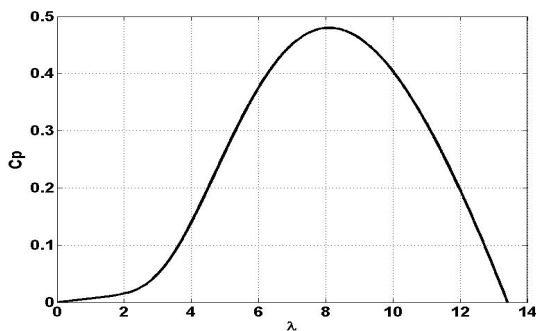


그림 4 효율계수곡선  
Fig. 4 the power coefficient curve

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda - 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (4)$$

여기서  $C_1 = 0.5176$ ,  $C_2 = 116$ ,  $C_3 = 0.4$ ,  $C_4 = 5$ ,  $C_5 = 21$ ,

$C_6 = 0.0068$ 이며 피치각 제어는 고려하지 않으므로  $\beta = 0$ 으로 설정하였다.

$\lambda - C_p$ 의 관계 그래프를 MATLAB을 이용하여 그림 4와 같이 나타내었다.

주속비와 효율계수의 관계곡선에 의하면 효율계수가 0.48인 최대가 되는 주속비가 존재한다는 것을 알 수 있다. 효율계수가 최대를 가질 때 발전기는 최대의 전력을 낼 수 있다.

### 2.2 풍력 터빈 특성

풍력발전시스템에서 바람의 속도에 대한 풍력터빈의 특성에 의하면 특정한 바람의 세기에서 출력전력과 회전속도 사이에는 그림 5와 같은 관계를 가지게 된다. 특정한 바람의 세기에서 특정한 터빈의 특성곡선이 나오게 되고 최대의 전력점이 존재하게 된다. 이 전력점에서 발전기를 회전하게 하면 발전기는 최대의 전력을 얻을 수 있게 된다.

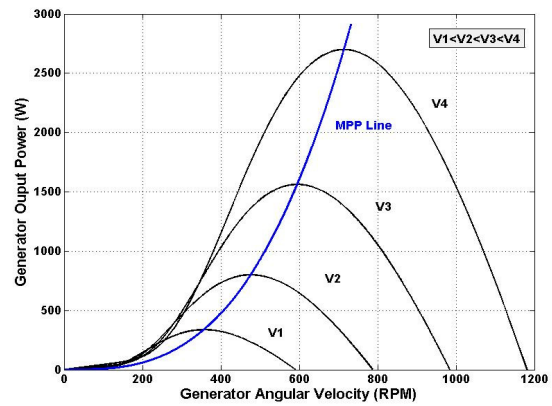


그림 5 풍력터빈의 특성곡선  
Fig. 5 Characteristic curves of the wind turbine

### 2.3 Switched-mode Rectifier

Switched-mode rectifier(SMR)(그림 6) 회로는 삼상 다이오드 정류기와 스위치 및 싱글 다이오드로 이루어져있다. 영구자석발전기의 고정자 동기임피던스와 SMR회로의 삼상 부스트 정류기의 형태를 지니게 되고 기존의 부스트 컨버터 시스템이랑 비슷한 동작을 하게 된다. SMR회로는 기존의 부스트 컨버터 회로보다 적은 수동소자를 가지고 같은 동작을 수행함으로써 경제적인 면에서 이득을 볼 수 있는 게 장점이다.

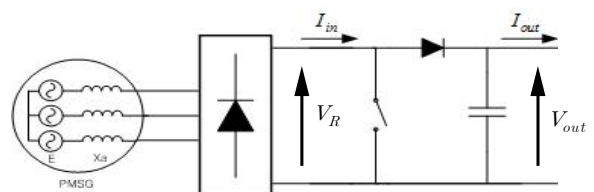


그림 6 SMR회로  
Fig. 6 SMR circuit

삼상 정류기 출력전압, 전류와 SMR출력전압 전류사이에는 아래 식과 같은 관계를 얻을 수 있다. (그림 7) 발전기의 리액턴스 성분과 스위치에 의하여 전압은 증압되게 된다[4].

$$V_R = (1-D)V_{out} \tag{5}$$

$$I_{out} = (1-D)I_{in} \tag{6}$$

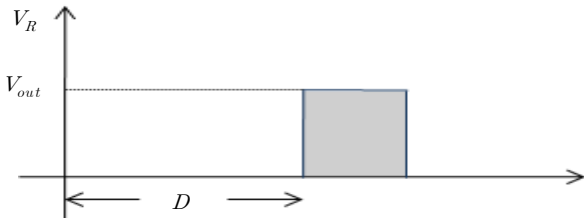


그림 7 정류기 출력전압  
Fig. 7 The output voltage of the rectifier

다음절에서 나오게 되는 인버터에서 DC-link의 전압을 정전압제어를 하게 된다. SMR에서 스위치에 의해서 부스팅은 되지만 인버터에서는 정전압 제어를 하게 되어 결론적으로는 SMR의 스위칭에 의해서 정류기의 출력전압  $V_R$ 이 변하게 된다. 식(5)에 의하면 듀티비가 커질수록 정류기 출력전압  $V_R$ 은 작아지게 되고 듀티비가 작아질수록  $V_R$ 은 커지게 된다.

2.4 계통연계 형 삼상 인버터

삼상 인버터 모델링을 하기 위하여 계통 삼상 전압, 전류를 3상 2상 좌표변환을 하여 제어하게 된다. 저항과 인덕터 필터에 의한 전압방정식을 세우게 되면 식(7)과 같이 나타낼 수 있다. 좌표변환을 통하여 식(7)에는 역기전력 전향 보상성분이 나타나게 되고 이는 보상함으로써 제거할 수 있다 [5].

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R+pL & -\omega L \\ \omega L & R+pL \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + E \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{7}$$

DC-link 캐패시터에서 전력의 관계식을 식 (8)와 같이 얻을 수 있다.

$$CV_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = P_{in} - P_{out} = P_{in} - \frac{3}{2}e_d i_d \tag{8}$$

PI제어기 (식(9))로 전압제어기 구성가능하고 Closed-loop 전달함수는 식(10)과 같이 표현할 수 있고 이로써 정전압제어기를 구성할 수 있다.

$$i_d^* = K_p (V_{dc}^* - V_{dc}) + K_i \int (V_{dc}^* - V_{dc}) + P_{in} / \frac{3}{2}e_d \tag{9}$$

$$\frac{V_{dc}}{V_{dc}^*} = \frac{\frac{3}{2}e_d K_i + \frac{3}{2}e_d K_p s}{CV_{dc} s^2 + \frac{3}{2}e_d K_p + \frac{3}{2}e_d K_i} \tag{10}$$

정전압제어기와 전류제어기를 결합하여 인버터 제어블록도를 구성할 수 있고 그 블록 구성은 그림 8과 같이 나타낼 수 있다.

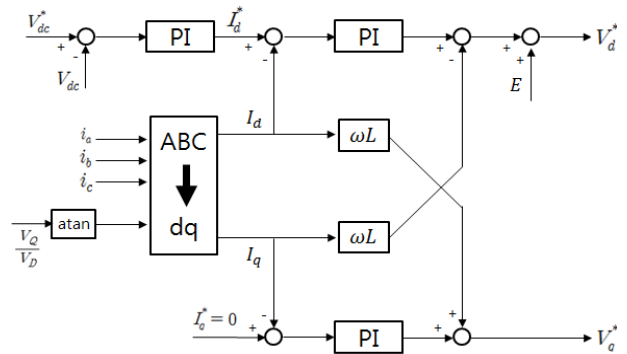


그림 8 인버터 제어블록도  
Fig. 8 Block diagram of the inverter control system

인버터 제어를 통하여 DC-link 전압은 정전압제어를 하게 되고 계통 전압 전류는 단위 역률로 제어하게 된다.

2.5 센서리스 MPPT제어

본 시스템에서는 기계적인 속도 센서없이 SMR회로의 듀티비를 가변하여 최대의 전력을 추종하는 MPPT제어 방법을 사용하였다. 듀티비에 의하여 최대의 전력을 추종하기 위해서는 전력과 듀티비 사이의 상관관계가 필요하다. 터빈의 특성곡선을 바탕으로 연쇄법칙을 사용하여 듀티비와 전력사이의 관계를 그림 9와 같이 얻을 수 있다[6].

$$\frac{dP}{dD} = -\frac{dP}{d\omega} = 0 \tag{11}$$

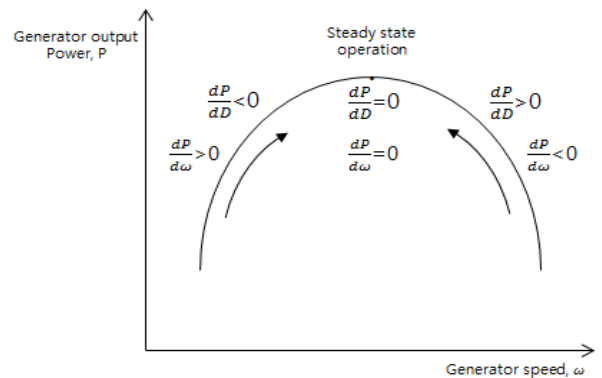


그림 9 MPP tracking 과정  
Fig. 9 MPP tracking process

듀티비와 전력사이의 관계로부터 그림 10과 같은 MPPT 알고리즘을 작성할 수 있다.

- (1) 시작할 때 초기 듀티비를 설정하고 듀티 단계를 증가한다.
- (2) 측정해 온 전압전류로 전력을 계산한다.

(3) 이전 전력 값과 비교를 하여 전력이 상승하면 원래 동작을 그대로 수행하고 아니면 역으로 동작을 하게 한다.  
 (4) (2),(3),(4)번을 반복한다.

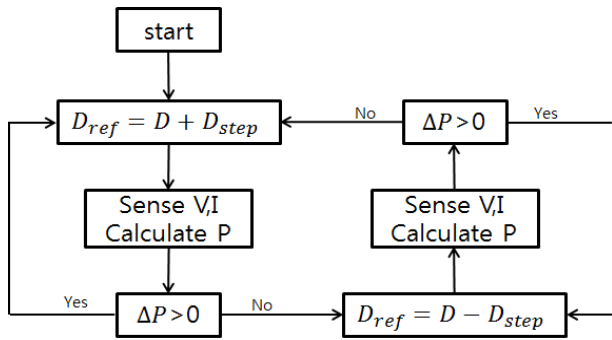


그림 10 MPPT 제어 알고리즘  
 Fig. 10 MPPT control algorithm

전력 계산에 필요한 전압과 전류는 인버터에서 좌표변환을 통한 전압 전류로 계산을 한 값이다. 알고리즘은 전력의 변화를 통해서 전력이 커지면 원래의 동작을 그대로 수행하고 아니면 동작을 역으로 수행하여 최대의 전력점을 추종하게 되고 이로써 MPPT제어를 할 수 있다.

### 2.6 시뮬레이션

제한한 풍력발전시스템을 검증하기 위하여 PSIM 시뮬레이터를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 실제 실험정수를 기초로 하여 시뮬레이션을 하였고 시뮬레이션 정수는 표 1에 보이바와 같다.

표 1 풍력발전시스템 변수

Table 1 Parameters of the wind generation system

Generator rated power	3.7k	W
rated voltage	380	V
rated current	7.7	A
stator resistance	0.324	Ω
d-axis inductance	10.1	mH
q-axis inductance	27.37	mH
back-emf constant	159.8	Vpk/krpm
rated speed	1800	rpm
pole pair	4	
DC-link capacitor	8200	uF
Grid filter inductance	3	mH
Grid filter resistance	0.05	Ω
Grid filter capacitance	10	uF
Grid voltage	60	V

그림 11은 MPPT 제어를 통하여 효율계수가 최대의 값인 0.48을 추종하는 것을 보여주고 있고 최대의 효율계수를 갖게 하는 주속비의 값은 그림 12에서 8인 값을 추종하는 것을 볼 수 있다.

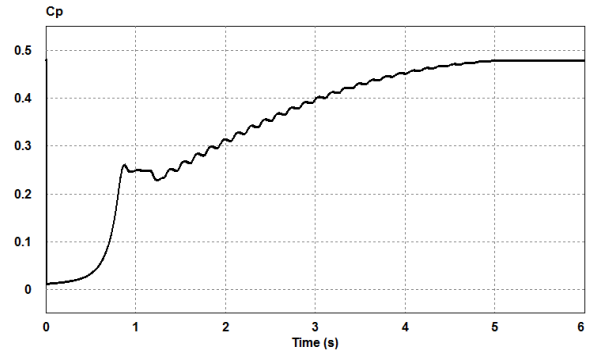


그림 11 효율계수 Cp  
 Fig. 11 Power efficient Cp

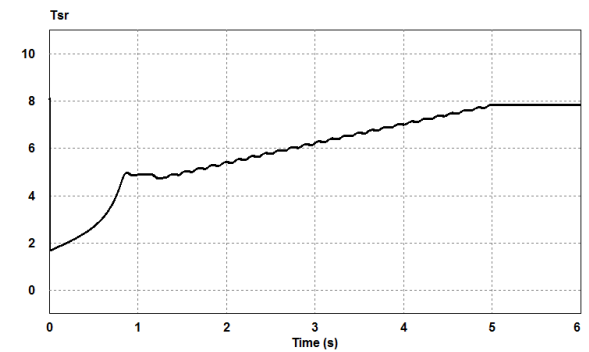


그림 12 주속비 Tsr(λ)  
 Fig. 12 Tip speed ratio

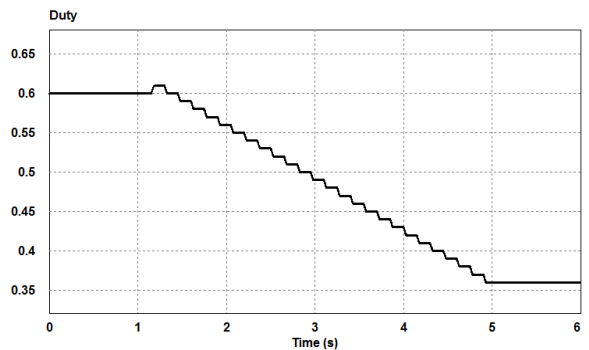


그림 13 SMR의 듀티비  
 Fig. 13 Duty ratio of the SMR

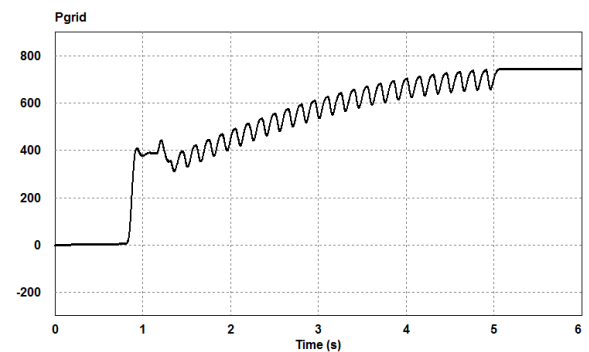


그림 14 인버터 출력전력  
 Fig. 14 Output power of the inverter

그림 13은 SMR회로에서 MPPT제어를 수행하여 최대의 전력을 낼 수 있는 듀티값으로 추종하는 것을 볼 수 있다. 출력 전력은 그림 14에 보이는 바와 같고 최대의 전력을 내고 있음을 확인할 수 있다.

인버터 제어에 의하여 DC-link 전압은 300[V]로 정전압 제어가 되는 것을 그림 15에서 확인할 수 있고 계통에 전력을 최대 보내기 위한 전압 전류의 위상이 동일함을 그림 16을 통하여 확인할 수 있다.

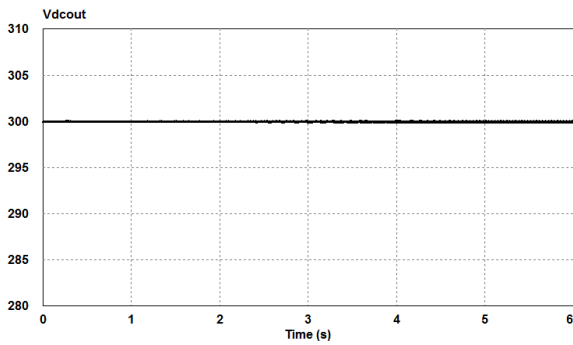


그림 15 DC-link 전압  
Fig. 15 Voltage of the DC-link

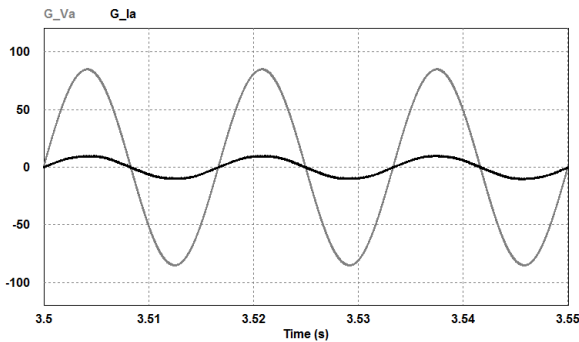


그림 16 계통 상전압 및 상전류 파형  
Fig. 16 Grid phase voltage and current waveforms

### 2.7 실험 결과

전체시스템은 DSP28335를 이용하여 제어하였고 DSP의 Digital to analog converting(DAC) 기능을 사용하여 그림 17의 변수들을 관찰하였다. 그림 17에서 오른쪽 면에서 위에서부터 순서대로 듀티, 효율계수 Cp, 주속비 Tsr 및 계통 전력을 나타내고 있다. DA의 스케일링에 의하여 각 변수가 표시하는 전압값은 실제값으로 환산하여야 한다. 그 환산값은 표 2에 나타내었다.

표 2 DA값과 실제 환산값  
Table 2 DA value and the real value

	DA 출력값	실제환산값
Cp	0~10V	0~0.5
Tsr	0~10V	0~15
Duty	0~10V	0~1
Pgrid	0~10V	0~1000W

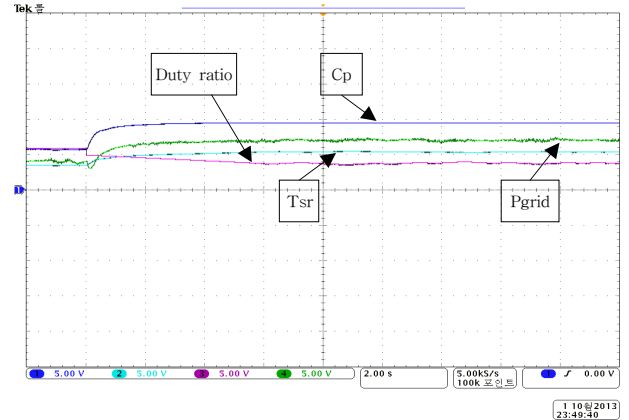


그림 17 듀티비 Cp, Tsr 및 계통전력  
Fig. 17 Duty ratio, Cp, Tsr and Power of the grid

풍속 10[m/s]의 조건에서 실험을 진행하였다. 표 2와 결합하여 보면 그림 17에서 알 수 있다시피 듀티값은 최대의 전력을 내는 듀티값으로 추종하고 있고 효율계수인 Cp는 0.48인 최대의 값을 추종하고 있다. 마찬가지로 주속비도 8인 값을 추종하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이때 블레이드 출력전력은 1.2[kW]이고 발전기의 출력전력은 810[W] 정도로 나오고 계통으로 전달되는 전력값은 그림 17에서 700[W]정도로 확인이 되었다.

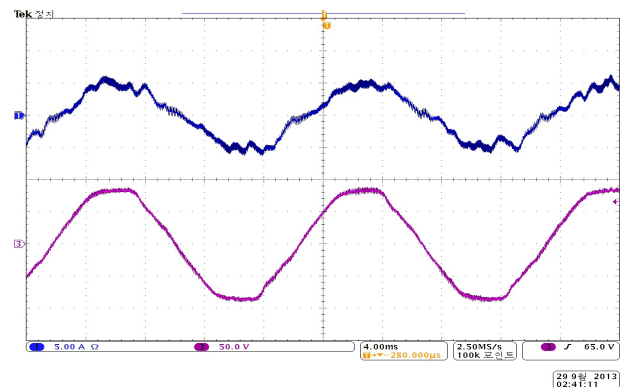


그림 18 계통 전류(상)와 계통전압(하) 파형  
Fig. 18 Grid current and voltage waveforms

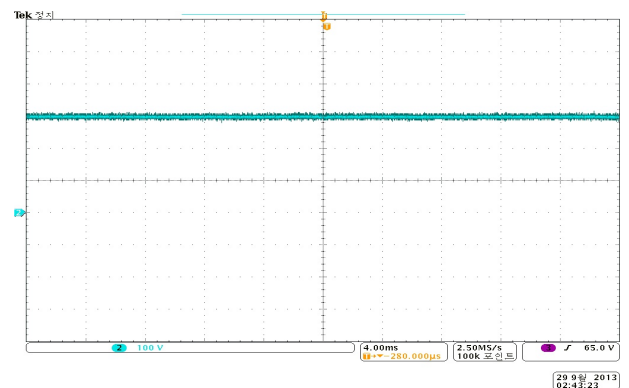


그림 19 DC-link 전압  
Fig. 19 Voltage of the DC-link

그림 18은 계통전류와 전압 파형을 보여주고 있고 각각 대략 3.54[Arms], 60[Vrms]로 확인이 되었다. 블레이드에서 생성된 전력은 계통으로 흘러나감에 따라 동일 위상을 유지하고 있음을 보여주고 있다. 인버터제어 의하여 DC-link정 전압 제어를 하고 있음을 그림 19에서 확인할 수 있다.

### 3. 결 론

SMR 회로와 센서리스 MPPT를 결합한 풍력발전시스템을 시뮬레이션을 통하여 가능성을 확인하였고 실험을 통하여 검증하였다. 제안한 시스템은 기존의 풍력발전시스템보다 소형으로 및 경량으로 만들 수 있고 제어가 간단하다. 그리고 수동소자의 제거로 단가를 줄일 수 있고 센서를 사용하지 않아 센서의 유지 보수 등에 들어가는 비용을 절감할 수 있다. 또한 최대의 전력을 낼 수 있는 추종제어가 가능하여 발전기의 효율적인 면에서도 이득을 볼 수 있어서 소형 풍력발전시스템에 매우 적합한 시스템이라 할 수 있다.

### 감사의 글

본 논문은 인하대학교 지원에 의해 수행되었습니다.

### References

- [1] C.A. Hernandez-Aramburo, T.C. Green, and N. Mugniot, "Fuel consumption minimization of a microgrid", IEEE Trans on Industry Applications, Vol. 41, No. 3, pp.673-681, May-June, 2005
- [2] Hye-su Shin, Chengde Xu, Joon-Min Lee, Jae-Du La and Young-Seok Kim, "MPPT control technique for a PMSG wind generation system by the estimation of the wind speed", ICEMS, Oct.2012
- [3] R.Esmaili, L. Xu and D.K.Nichols, "A New Control Method of Permanent Magnet Generator for Maximum Power Tracking in Wind Turbine Application", Power Engineering Society General Meeting, Vol.3, Jun.2005
- [4] D.M. Whaley, W.L. Soong and N. Ertugrul, "Investigation of Switched-mode Rectifier for Control of Small-scale Wind Turbines", Proceedings of IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Vol.4, pp.2849-2856, 2005
- [5] M. Chinchilla, S. Arnaltes, J.C.Burgos, "Control of Permanent Magnet Generators Applied to Variable-Speed Wind-Energy Systems Connected to the Grid", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.21, No.1, 2006.3
- [6] E. Koutroulis, and K. Kalaitzakis, "Design of a Maximum Power Tracking System for Wind Energy Conversion Applications", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.53, No.2, pp.486-494, 2006.4

## 저 자 소 개



### 허 성 덕 (許 成 德)

1989년 1월 23일생. 2012년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 2012년~현재 동 대학원 전기공학과 석사 과정

Tel : 032-860-7397

E-mail : xuchengde7@hotmail.com



### 이 준 민 (李 俊 旻)

1982년 6월 16일생. 2009년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년~2012년 LS 산전 근무. 2013년~현재 인하대 공대 전기공학과 박사 과정

Tel : 032-860-7397

E-mail : wnsalslddi0@naver.com



### 김 영 석 (金 榮 石)

1951년 6월 11일생. 1977년 인하대 전기공학과 졸업. 1987년 일본 나고야대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1987년~1989년 전기연구원 전력전자연구실장. 1989년~현재 인하대 전기공학과 교수

Tel : 032-860-7397

Fax : 032-863-5822

E-mail : youngsk@inha.ac.kr