

농형 유도기 터빈 모델을 이용해 구현한 영구자석 동기기 풍력발전 시스템의 MPPT 제어

논문
61-2-7

The MPPT Control Method of the PMSG Wind Generation System using the Turbine Model with a Squirrel Cage Induction Motor

이준민* · 김동화* · 신혜수* · 김영석†
(Joon-Min Lee · Dong-Hwa Kim · Hye-Su Shin · Young-Seok Kim)

Abstract - This paper presents the MPPT(Maximum Power Point Tracking)control method of the PMSG wind generation system using the turbine model with a squirrel cage induction motor. The torque of squirrel cage induction turbine model is controlled by mathematization of speed characteristics of real blade. In this paper, maintenance and cost issues into consideration, except for previous method using information of the velocity of the wind speed sensor, the algorithm is presented. The algorithm is controlled by tracking the optimal point, the generator speed and maximum grid power. The vector controls of the generator side converter and the grid side converter are controlled respectively to obtain maximum torque and regulate unity power factor. With Psim simulations and experiments, the efficiency of squirrel cage induction turbine model and the validity of control algorithm are verified.

Key Words : Wind generation, Turbine model, P&O MPPT, PMSG, IM

1. 서론

환경 보호에 대한 관심이 더욱 높아져가는 이 때에 기존 에너지원과는 달리 환경오염이 거의 없는 풍력발전을 통한 전기에너지 생산에 대한 관심이 높아지고 있다. 또한 최근 대체에너지 개발 및 보급에 관한 촉진 법률이 시행되면서 대규모 풍력발전단지 건설에 대한 추진이 활발하게 이루어지고 있다.[1]

신재생에너지의 종류는 풍력발전, 조력발전, 파력발전, 온도차발전, 풍력발전, 태양광발전 등이 대표적으로 연구되고 있다. 이 중에 풍력발전은 타 에너지원과 비교해 볼 때 발전에 제한조건이나 단점을 거의 찾아볼 수 없으며, 국내 자연 환경에 적용하기에 많은 장점을 지니고 있고, 기존의 비재생 에너지와 비교해도 대등하게 발전비용이 저렴해 청정에너지로 손색이 없음을 확인할 수 있다.

그림 1은 영구자석 동기기 풍력발전 시스템의 블록도를 나타낸다. 본 논문은 유지보수와 가격적인 문제를 고려해 볼 때, 풍속 정보를 측정하는 센서 없이 MPPT 제어를 수행하는 알고리즘의 유효성을 검증하는 것을 목표로 한다.

하지만 실제 풍력발전 시스템의 블레이드의 특성을 제한된 연구실 환경내에서 실험하기는 매우 어렵다. 따라서 이러한 난점을 해소하기 위하여 본 논문은 농형 유도기 터빈 모델을 사용하는 영구자석 동기발전기 Back-To-Back 컨버터 풍력발전 시스템을 그림 2와 같이 제안하였다. 그림 2에

나타난 농형 유도기 터빈 모델 풍력발전 시스템은 블레이드의 토크를 수식화하여 구현하였으므로 풍속과 발전기 속도에 연관된 종속적인 변수인 풍력발전기 터빈의 실제 토크 특성을 테스트 할 수 있다.

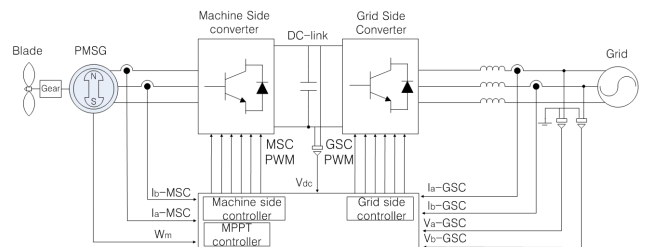


그림 1 영구자석 동기기 풍력발전 시스템
Fig. 1 Wind generation system of a PMSG

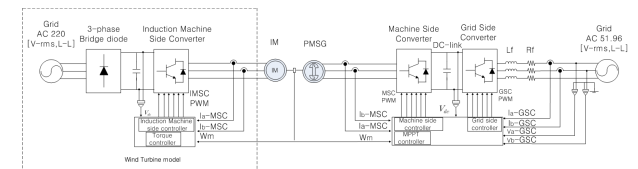


그림 2 농형유도기 터빈 모델 구현한 풍력발전 시스템
Fig. 2 Wind generation system with a squirrel cage induction motor turbine model

* 준 회원 : 인하대 공대 전기공학과 석사과정

† 교신저자, 펠로우회원 : 인하대 전기공학과 교수

E-mail : youngsk@inha.ac.kr

접수일자 : 2011년 1월 2일

최종완료 : 2011년 11월 1일

제안된 알고리즘은 PSIM 시뮬레이션과 실험을 통해 그 타당성이 검증된다.

2. 본 론

2.1 풍력 터빈 모델

풍력발전기의 시스템에 입력되는 에너지는 블레이드에서 변환된 기계적 에너지 P_{blade} 로 다음과 같다.[2]

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

여기서 A 는 블레이드의 회전 단면적 [m^2], ρ 는 공기의 밀도 [Kg/m^3], v_{wind} 는 풍속 [m/s], $C_p(\lambda)$ 는 블레이드의 출력계수이다. 식 (1)에서 출력계수란 풍속 v_{wind} 의 바람이 가지고 있는 전체 에너지 중에서 블레이드가 받아들이는 에너지의 비율을 의미하며, 풍속에 대한 블레이드의 회전속도의 비율인 주속비(TSR : Tip Speed Ratio) λ 에 따라 변화한다. 이러한 출력계수는 블레이드의 설계에 따라 달라지며 피치각 제어가 없는 이상적인 모델링으로 구성된 임의의 블레이드 출력계수는 주속비 λ 의 함수로 matlab simulink를 참고하여 식 (2)와 같이 근사화 하였다.[3]

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

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda - 0.08 \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2)$$

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 고려하고 있지 않으므로 $\beta = 0$ 으로 설정하였다.

또한 주속비 λ 는 식 (3)과 같이 정의된다.

$$\lambda = \frac{\omega_{blade} R_{blade}}{v_{wind}} \quad (3)$$

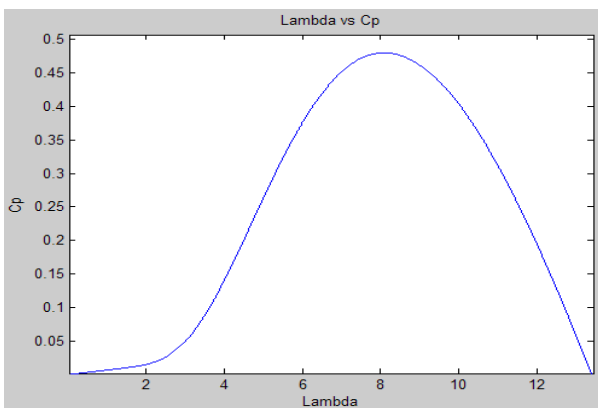


그림 3 출력계수 대 주속비의 관계
Fig. 3 Cp(Power Coefficient) vs TSR(Tip Speed Ratio)

여기서 ω_{blade} 는 블레이드의 회전속도 [rad/s], R_{blade} 는 블레이드의 회전반경 [m]이다. 그림 3은 본 논문에서 사용한 터빈 모델의 주속비에 따른 출력계수의 변화를 나타내고 있다.

발전기 회전속도의 증가로 인해 주속비가 점점 커지면 블레이드의 출력계수, 즉 출력효율이 증가하다가 특정속도 이상으로 빨리 회전하게 되면 효율이 떨어지는 것을 볼 수 있다.

따라서 블레이드의 파워는 식 (2)와 식 (3)을 참고한다면 풍속과 발전기 속도의 변화에 종속적인 함수임을 알 수 있고, 블레이드의 파워를 식 (1)과 같이 계산 할 수 있다. 이를 이용해 블레이드 토오크 T_{blade} 를 식 (4)와 같이 계산 할 수 있다.

$$T_{blade} = \frac{P_{blade}}{\omega_{blade}} = \frac{1}{2} A \rho v_{wind}^3 \frac{C_p(\lambda)}{\omega_{blade}} \quad (4)$$

그림 3에 나타난 최대 출력을 내는 점은 블레이드의 특성으로 인해 그림 4와 같이 각 풍속마다 단 하나의 점만이 존재하며 이러한 출력지점에서 발전기를 동작시키는 MPPT제어를 하는 제안된 제어 알고리즘을 2.2절에서 다루도록 하겠다.[4]

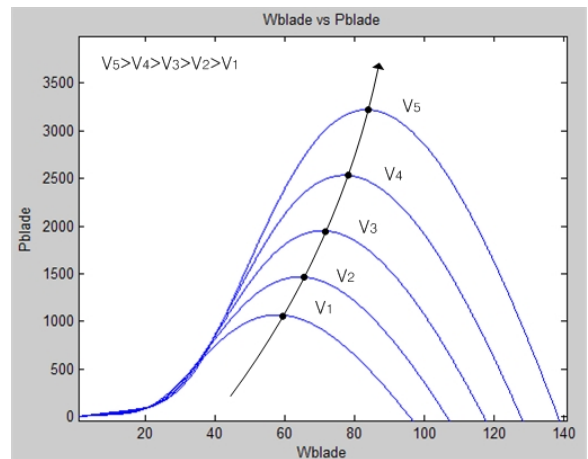


그림 4 각 풍속별 속도의 변화에 따른 최대 파워 곡선
Fig. 4 Power curves about angular speeds according to various wind velocity

2.2 P&O(Perturbation & Observation) MPPT제어

그림 4에서 알 수 있듯이 블레이드의 최적의 파워를 출력하는 발전기의 최적 속도는 각각의 풍속에서 단 하나의 지점이다. 제안된 알고리즘은 이 특성을 이용하여 최대전력의 출력점을 추종하는 방법을 제시하였다. 제안된 알고리즘에 대하여 간략히 설명하면 다음과 같다.

- 1) 발전기 회전 속도의 초기 지령치를 결정하고 발전기 출력파워를 측정한다.
- 2) 지령 속도를 한 단계 증가시키거나 감소시켜 그때의 속도와 출력 파워를 다시 측정한다.
- 3) 출력파워와 속도의 변화에 따른 $Sign(\Delta P)$ 와 $\Delta \omega$ 를 계산한다.
- 4) $w_{ref}(n) = w_{ref}(n-1) + Sign(\Delta P)\Delta \omega$
- 5) 최적의 운전점에 이를 때 까지 2~4의 과정을 반복한다.

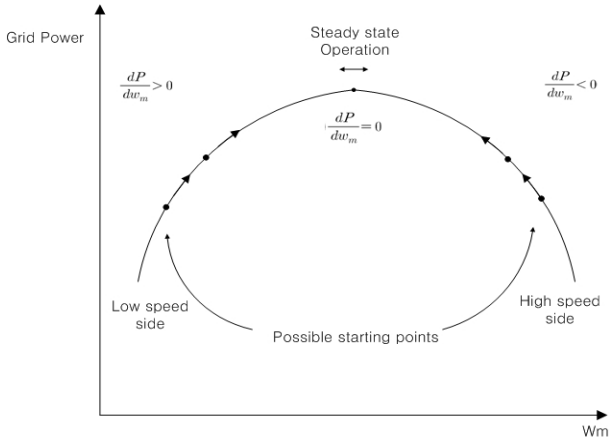


그림 5 발전기의 속도와 계통파워의 출력변화를 이용한 P&O MPPT 알고리즘

Fig. 5 P&O MPPT algorithm using change of generator rpms and grid powers

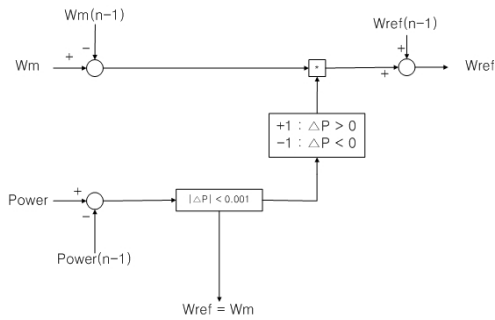


그림 6 P&O MPPT 알고리즘 블록도

Fig. 6 P&O MPPT algorithm block diagram

제안된 알고리즘은 그림 5와 그림 6에 나타나 있다.

※ 제안된 MPPT 제어 시스템의 원리

- 1) 발전기의 속도 증가 시: 출력파워의 증가→발전기 속도지령을 증가시킨다.
- 2) 발전기의 속도 증가 시: 출력파워의 감소→발전기 속도지령을 감소시킨다.
- 3) 발전기의 속도 감소 시: 출력파워의 감소→발전기 속도지령을 증가시킨다.
- 4) 발전기의 속도 감소 시: 출력파워의 증가→발전기 속도지령을 감소시킨다.

2.3 농형 유도기를 이용한 풍력 터빈 모델

식 (1)에 표시된 블레이드 파워를 이용해 블레이드의 토크를 계산해 보면 식 (4)와 같으며 이 값을 터빈 모델측 유도기 컨버터의 토크 지령치로 한다.

$$T_{turbine}^* = T_{blade} \tag{5}$$

식 (5)의 토크 지령치를 이용하여 유도기에 가해지는 토크를 이용해 유도기 q축 전류 지령치를 식 (6)과 같이 계산한다.[5]

$$I_{qse}^* = \frac{T_{turbine}^* L_r}{\frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m \lambda_{ds}} \tag{6}$$

여기서, T_{blade} 는 풍력 터빈에 입력되는 토크[N·m], L_r 은 회전자 권선의 자기 인덕턴스, P 는 극수, L_m 은 상호 인덕턴스, λ_{ds} 는 회전자 기준 자속이다.

식 (4)를 이용해 입력풍속과 발전기 속도에 따라 파워가 변화하는 터빈의 특성을 적용한 블레이드 모델을 구현하였으며, 계산된 블레이드의 토크를 이용하여 유도기의 토크 제어를 하도록 하는 풍력터빈 모델을 구현하였다.

2.4 유도기 터빈모델측 컨버터 제어기

유도 전동기의 회전자 좌표계 전압 방정식은 다음과 같다.[5]

$$v_{dre} = R_r i_{dre} + \frac{d}{dt} \lambda_{dre} - (\omega - \omega_r) \lambda_{qre} \tag{7}$$

$$v_{qre} = R_r i_{qre} + \frac{d}{dt} \lambda_{qre} + (\omega - \omega_r) \lambda_{dre} \tag{8}$$

여기서 v_{dre} , v_{qre} 은 회전자 좌표계 dq축 지령 전압, R_r 은 회전자 저항, λ_{dre} 은 d축 쇄교 자속, λ_{qre} 은 q축 쇄교 자속, i_{dre} , i_{qre} 은 회전자 좌표계 dq축 전류, ω 는 동기 좌표계 속도, ω_r 은 회전자 좌표계 속도이다.

회전자 자속 기준 간접 벡터 제어 시, 토크 방정식은 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3}{4} \frac{P L_m}{L_r} \lambda_{dre} i_{qre} \tag{9}$$

또한 슬립 각속도는 다음과 같다.

$$w_{sl} = \frac{R_r i_{qre}}{L_r i_{dre}} \tag{10}$$

유도기측 컨버터는 d축 전류 제어를 하여 자속 성분을 제어하며, 2.3절에서 언급한 것과 같이 터빈 수식을 사용하여 발전기 속도에 따라 계산된 블레이드 파워를 속도로 나누어 토크를 계산한다. 계산한 토크를 이용하여 유도기의 q축 전류 지령치를 구하고 그 전류를 제어하여, 유도기측 컨버터의 토크분 전류 제어를 한다.

2.5 영구자석 동기발전기측 컨버터 제어기

영구자석 동기전동기의 동기 좌표계 전압방정식은 다음과 같다.[6]

$$\begin{bmatrix} V_{d_MSC}^r \\ V_{q_MSC}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d & -w_r L_q \\ w_r L_d & R_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d_MSC}^r \\ i_{q_MSC}^r \end{bmatrix} + w_m \psi_a \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{11}$$

여기서 $V_{d_MSC}^r$, $V_{q_MSC}^r$ 은 고정자 dq축 지령전압, R_s 는

고정자 저항, L_d 는 고정자 d축 인덕턴스, L_q 는 고정자 q축 인덕턴스, $i_{d_MSC}^r, i_{q_MSC}^r$ 은 고정자 dq축 전류, ψ_a 는 영구자석 자속 그리고 p 는 미분연산자이다. 영구자석 동기전동기의 토크 방정식은 d축 전류를 0으로 제어할 때 식 (11)과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \psi_a i_{q_MSC}^r \quad (12)$$

발전기의 d축 전류는 자속축에 맞춰져 있으므로 식 (11)과 같이 q축 전류를 조절하여 최대 토크를 내도록 제어된다. 따라서 P&O MPPT 제어를 통해 최대 출력을 내는 동작지점의 속도 지령치를 만들어 내고 d축 전류를 0으로 q축 전류를 최대로 하여 발전기가 최대 토크를 내도록 제어한다.

2.6 계통측 컨버터 제어기

3상 인버터 회로의 동기좌표계 전압방정식은 다음과 같다.[7]

$$\begin{bmatrix} V_{d_GSC}^r \\ V_{q_GSC}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R+pL_f & -wL_f \\ wL_f & R+pL_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d_GSC}^r \\ i_{q_GSC}^r \end{bmatrix} + |V| \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서 $V_{d_GSC}^r, V_{q_GSC}^r$ 는 고정자 dq축 전압, R 은 필터의 저항성분, L_f 는 필터의 인덕턴스, $i_{d_GSC}^r, i_{q_GSC}^r$ 는 고정자 dq축 전류, V 는 계통전압 그리고 p 는 미분연산자이다.

발전기측에서 공급되는 전력이 계통으로 전달되는 전력보다 클 경우 DC링크 전압이 증가하며 반대의 경우 DC링크 전압은 감소하므로 계통측 인버터는 d축 전류를 제어함으로써 DC링크의 전압을 일정하게 유지한다. DC링크 전압의 지령과 실제 값의 오차를 이용해서 만들어낸 d축 전류를 최대로 q축 전류를 0으로 제어하여 단위역률로 계통을 동작하도록 제어한다.

2.6 모의 실험

그림 7은 PSIM 시뮬레이션으로 구현한 농형 유도기 터빈 모델을 사용한 Back-To-Back 컨버터 영구자석 동기발전기 시스템의 시뮬레이션 블록이다. 하드웨어의 정격 전류를 넘어가지 않는 범위 내에서 시뮬레이션을 하였다. 실험과 시뮬레이션에 적용된 파라미터는 표 1에서 보여준다. 시뮬레이션과 실제 시스템 파라미터가 일치하므로 뒷 절에서 이에 대한 언급은 하지 않겠다.

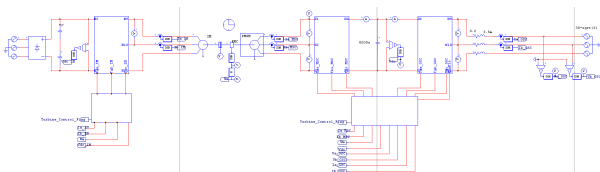


그림 7 시뮬레이션 블록도
Fig. 7 Simulation block diagram

표 1 시스템 파라미터

Table 1 System parameter

PMSG parameter	
rated power	3.7[kW]
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-e.m.f constant	112.99[Vpeak/krpm]
rated speed	1800[rpm]
pole pair	4
IM parameter	
rated power	7.5[kW]
rated voltage	380[V]
rated current	15.5[A]
stator resistance	0.464[Ω]
rotor resistance	0.501[Ω]
stator inductance	79.16[mH]
rotor inductance	79.16[mH]
mutual inductance	76.16[mH]
rated speed	1755[rpm]
pole pair	4
Grid parameter	
input phase voltage	30[V]
filter inductance	3.5[mH]
filter resistance	0.324[Ω]
capacitance	8200[μF]
Turbine parameter	
rated Vwind	10[m/s]
blade radius	1.26[m]
air mass	1.225[kg/m ³]
swept area	4.98759[m ²]
C_{p-max}	0.48
T_{sr-opt}	8
Gear ratio	1

2.6.1 모의 실험 결과

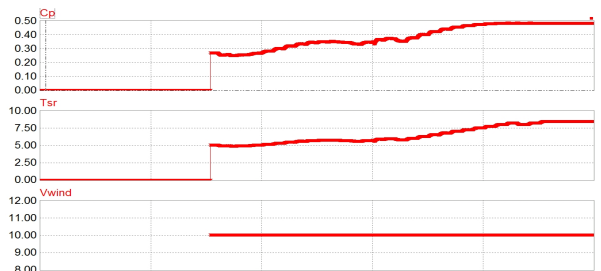


그림 8 파워 계수(Cp)(상), 주속비(Tsr)(중)와 풍속 파형(하)
Fig. 8 Power coefficients(up), tip speed ratios(middle) and wind velocities(down)

그림 8은 MPPT 제어 시 발전기 속도가 최적점을 찾아감에 따라 C_p 가 최적값이 0.48, 주속비는 8이 나온 것을 확인하였다.

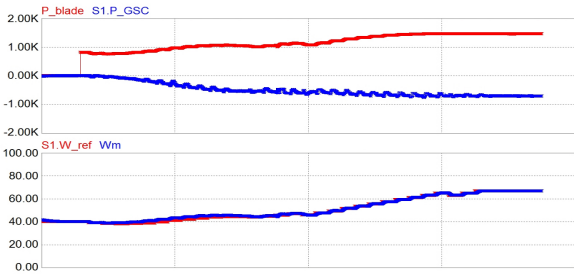


그림 9 블레이드와 계통의 파워(상), 지령속도와 실제속도 (하)
 Fig. 9 Blade and system powers(up), reference rpms and actual rpms(down)

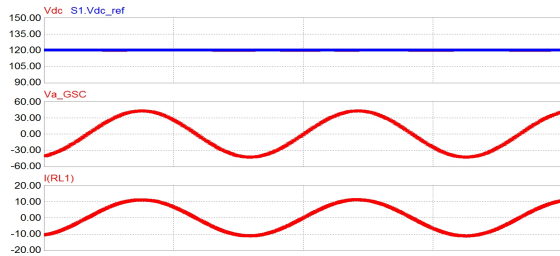


그림 10 DC 전압(상)과 계통의 a상 전압(중), 전류(하)
 Fig. 10 DC voltage(up) and a phase a voltages(middle) and currents(down) of the grid

그림 9는 블레이드 파워와 계통 파워로써 1.4[kW], 손실을 고려한 0.8[kW]이다. 그림 10을 통해 계통측 컨버터가 DC 링크 전압 일정 제어와 단위 역률 제어를 확인할 수 있다.

2.7 실험 결과

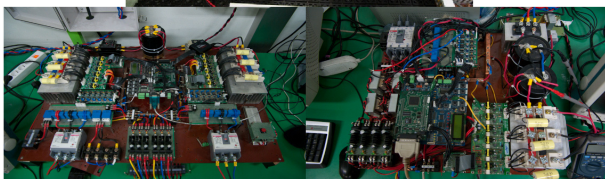
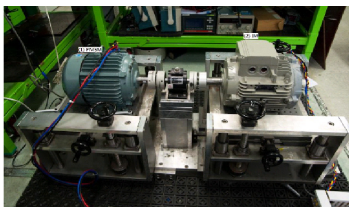


그림 11 실험 장치
 Fig. 11 Experimental equipments

그림 12는 P&O MPPT 알고리즘에 따라 가변되며 추종하는 발전기 속도 지령값과 발전기 속도 지령치를 나타낸다. 발전기 속도는 풍속 10[m/s]에서 최적의 값인 610[rpm]의 속도에서 안정됨을 확인 하였다.

그림 13은 발전기 속도로 인해 변화되는 C_p 와 주속비 λ 의 변화를 나타낸다. 변화하는 발전기 속도로 인해 C_p 의 최대 출력값인 0.48, 주속비는 최적의 값인 8을 얻어내었다.

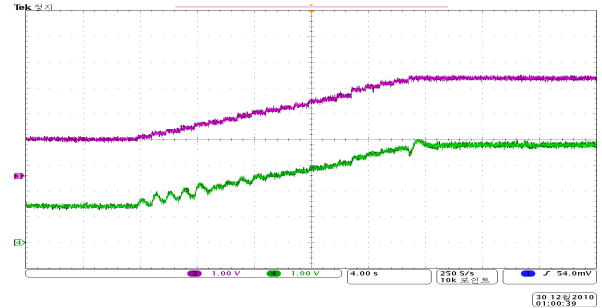


그림 12 지령속도(상)와 실제속도(하)
 Fig. 12 Reference rpms(up) and real rpms(down)

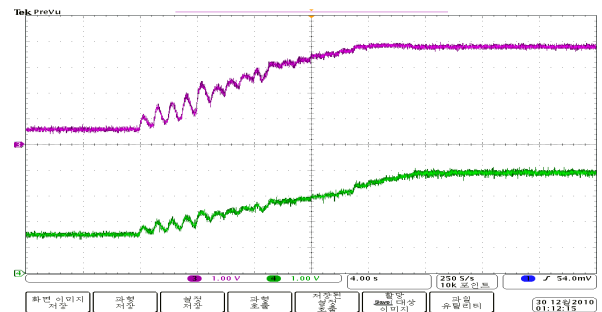


그림 13 C_p (상)와 Tsr(하)
 Fig. 13 Power coefficients(up) and tip speed ratios(down)

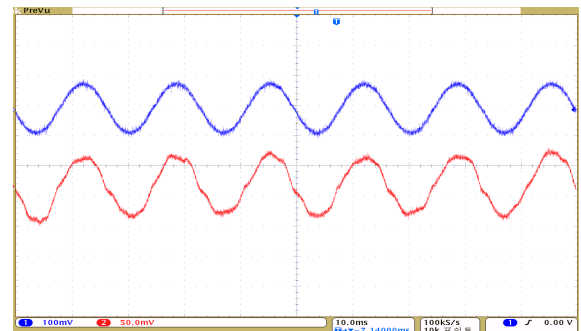


그림 14 계통 전압파형(상)과 전류파형(하)
 Fig. 14 Grid voltages(up) and currents(down)

그림 14는 C_p 의 변화로 인해 변화하는 블레이드 파워와 계통 파워를 나타낸다. 블레이드 모델에서 생성된 파워는 대략 1.4[kW]이며 계통으로 넘어가는 파워는 약 0.6[kW]이다.

계통으로는 약 10[A]의 전류가 흐름을 확인 하였다. 전류의 방향을 계통측에서 발전기측 방향으로 설정하였으므로 초기 모터의 구동 시 전압과 전류의 방향은 역상이다. 발전기에서 생성된 파워가 계통으로 흘러나감에 따라 전압과 전류의 동상을 확인 할 수 있다.

3. 결 론

제한된 실험실 환경 내에서 풍력, 풍력 터빈 발전기의 MPPT 제어 알고리즘의 합당성을 테스트 하기란 매우 어렵다. 특히 블레이드 모델을 구현하기 어렵기 때문이다. 따라서 농형 유도기 터빈 시뮬레이터를 이용한 Back-To-Back

컨버터 영구자석 동기발전기 풍력발전 시스템을 구현하고 이를 이용하여 MPPT 알고리즘의 적합성을 테스트 하였다. 이 논문에 제시된 터빈 모델은 블레이드의 특성 곡선을 반영하므로 이를 이용하여 실제 블레이드의 특성을 반영한 제어 알고리즘을 테스트 해볼 수 있기 때문에 매우 뛰어난 방법이라 할 수 있다.

제안된 알고리즘을 통해 풍속정보를 측정하는 센서의 가격적인 부담을 줄일 수 있으며 최대 파워를 출력하는 지점에서 발전기의 운전이 가능하므로 발전기의 효율적인 운용과 가격적인 면을 고려하여 불 때 최대 전력을 출력하기 위한 합리적인 방법이라 말할 수 있다.

감사의 글

본 논문은 인하대학교 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 송승호, 김일환, 한병문, “풍력발전기의 전기적 특성과 계통연계시 상호작용”, 전력전자학회지, 6호, 제8권, pp.21-27, 2003.
- [2] 장석호, 박홍극, 이동춘, 김홍근 “소형 풍력발전용 영구자석형 동기발전기의 센서리스 제어”, 전력전자학회지, 14권 1호, pp.15-22, 2009.2
- [3] “Wind Turbine Model”Matlab, Simulink: PowerSys Toolbox, 2006.
- [4] Joanne Hui, Alireza Bakhshai, “A New Adaptive Control Algorithm for Maximum Power Point Tracking for Wind Energy Conversion Systems” IEEE Trans. Power Electronics Specialists Conference pp.4003-4007, 2008.6
- [5] 변윤섭, 왕종배, 백종현, 박현준, “새로운 유도전동기 백터제어 기법”, 한국철도학회 추계학술대회 논문집, 2권, pp. 680 - 688, 2000.11
- [6] M. Yin ,G. Li, M. Zhou, C. Zhao, “Modeling of the Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator for Integration”, IEEE Power Engineering Society, pp. 1-6, 2007
- [7] M. Chinchilla, S. Arnaltes, J. C. Burgos, “Control of Permanent-Magnet Generators Applied to Variable-speed Wind-Energy Systems Connected to the Grid”, IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 21, No. 1, PP.130-135, 2006.2

저 자 소 개



이 준 민 (李 俊 旻)

1982년 6월 16일생. 2009년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사)
Tel : 032-860-7397
E-mail : wnsalsldi0@naver.com



김 동 화 (金 東 和)

1982년 4월 13일생. 2009년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사)
Tel : 032-860-7397
E-mail : bkhdhwal@nate.com



신 혜 수 (申 惠 秀)

1986년 8월 25일생. 2011년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 2011년~현재 동 대학원 전기공학과 석사 과정
Tel : 032-860-7397
E-mail : shine868@nate.com



김 영 석 (金 榮 石)

1951년 6월 11일생. 1977년 인하대 전기공학과 졸업. 1987년 일본 나고야대 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1987년~1989년 전기연구원 전력전자연구실장. 1989년~현재 인하대 전기공학과 교수
Tel : 032-860-7397
Fax : 032-863-5822
E-mail : youngsk@inha.ac.kr