

Boost 컨버터와 계통연계 인버터를 이용한 풍력발전의 센서리스 MPPT 제어

논 문
60-7-12

Sensorless MPPT Control using a Boost Converter and a Grid Side Inverter in Wind Power Generation Systems

김도윤* · 이준민** · 김영석†
(Do-Yoon Kim · Jun-Min Lee · Young-Seok Kim)

Abstract - This paper proposes the control method of MPPT(maximum power point tracking) for the wind energy generation system using the duty ratio control of boost type DC-DC converter. For a lower cost and a higher reliability, the wind and the generator velocity sensors are removed. MPPT control is implemented by changing the duty ratio of the boost converter. Chain rule is applied by using each function. The grid side inverter is controlled to regulate unity power factor. The proposed control method was analyzed mathematically and verified by the computer simulation using PSIM.

Key Words : Maximum power point tracking(MPPT), Wind energy, Boost type, Grid side inverter, Unity power factor

1. 서 론

경제 발전은 에너지 사용을 증가시키지만 환경오염을 야기시켰고 에너지원의 고갈을 초래했다. 이 문제를 해결하기 위해 스마트 그리드 사업이 이루어지면서 신재생 에너지에 대한 연구가 급증하고 있다. 이 중 풍력, 조류, 태양광 등이 대표적으로 연구되고 있으며 특히 풍력발전은 설치비에 비해 발전단가가 낮지만 한 번 설치하게 되면 반영구적으로 이용할 수 있고 공해가 거의 발생하지 않으며 토지 이용의 효율성이 높다는 장점을 가지고 있다.

풍력발전 시스템은 베츠의 법칙으로 인해 입력 파워의 약 60% 이상은 변환이 어렵지만 그 발생한 에너지를 최대로 계통에 전달하기 위한 MPPT 제어가 필수요소이다.

풍력발전 시스템의 발전기로는 유도발전기와 PMSG(Permanent Magnet Synchronous Generator)가 주로 사용되고 있으며, 유도발전기는 가격이 싸고 견고하다는 장점이 있으나 역률이 낮고 교류여자전원이 필요하다는 단점이 있어 PMSG의 사용을 제안 하고 있다. 일반적으로 PMSG를 이용한 풍력발전시스템은 Back-to-back 컨버터를 이용하여 발생전력을 전력계통에 전달하고 있으나[1-3], 중소용량 풍력발전시스템에서는 발생전력을 제어하기위하여 회로 구성이 간단하여 가격이 저렴하고 효율이 양호한 Boost 컨버터를 사용하는 것이 유리하다.

Boost 컨버터를 이용한 MPPT 제어법으로는 최적회전속도를 도출하고 발전기의 속도가 최적속도를 추종하도록

Boost 컨버터의 전류를 제어하는 방법으로 발전기의 속도 센서가 요구되는 단점이 있으며[4], 발생전력이 Boost 컨버터의 듀티비와 회전속도의 함수임을 이용하여 등가회로를 통하여 최적의 듀티비를 도출하여 제어하는 방식으로 발전 시스템의 모든 회로정수가 요구되며[5], 풍속을 이용하여 최적의 Boost 전류를 제어하는 방식으로 풍속정보가 요구 된다[6]. 이에 대해 본 논문에서는 풍속과 회전속도에 대한 정보를 필요로 하지 않는 MPPT제어법을 제안한다.

본 논문의 3장에서는 Boost 컨버터의 듀티를 조절함으로써 MPPT 제어가 가능함을 이론적으로 검증하고 있다. 이를 바탕으로 제 4장에서 풍속과 발전기 회전속도 정보를 이용하지 않고, Boost 컨버터의 듀티 조절을 통해 발생전력을 최대효율로 계통에 전달하는 것에 대한 시뮬레이션을 수행하여 그 타당성을 보이고 있다.

2. 본 론

2.1 전체 시스템 구성

본 논문의 풍력발전 시스템 전체적인 구성은 그림 1과 같다. 풍속이 유입되어 블레이드가 회전하여 발생한 기계적 에너지는 전기에너지로 변환되어 다이오드 정류기, 부스트 컨버터, 인버터를 통해 계통으로 공급된다. 여기서 최적의 출력을 내기 위해 부스트 컨버터에서 듀티 제어를 수행한다. 여기서 발전기는 제어의 용이함과 고효율, 고역률에 유리한 PMSG를 선정하였다.

이 부스트 컨버터 시스템은 기존의 Back to back 컨버터 시스템과 비교하자면 단방향으로 제어를 수행하기 때문에 풍속에 의하여 입력파워가 발생하면 부스트 컨버터와 인버터는 이를 그대로 계통에 전달한다. 대신 전달하는 동안 부스트 컨버터는 전압을 증폭시켜줄 뿐만 아니라 듀티 제어를

* 준 회원 : 인하대 공대 전기공학과 석사과정
** 준 회원 : 인하대 공대 전기공학과 석사과정
† 교신저자, 펠로우회원 : 인하대 전기공학과 교수
E-mail : youngsk@inha.ac.kr
접수일자 : 2011년 1월 2일
최종완료 : 2011년 6월 7일

통해 터빈 및 발전기측에서 최적의 과위를 낼 수 있는 듀티로 제어를 수행하고, 인버터는 앞서 연산되는 과위 정보를 통해 DC링크단이 듀티에 의해 변화되더라도 안정적으로 역률을 1로 유지하며 계통으로 과위를 전달하는 역할을 수행한다. 부스트 컨버터의 MPPT를 위한 듀티 제어 알고리즘과 인버터의 역률제어를 중반부에 제시 제시되어 있다.

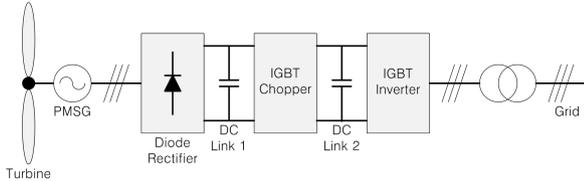


그림 1 풍력발전 시스템의 구성
Fig. 1 The configuration of wind power generation system

2.2 터빈 모델링

풍력발전기는 유입되는 바람 에너지가 블레이드를 돌려줌으로써 에너지의 1차 변환이 이루어진다. 이 때 발생한 에너지 P_{blade} 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

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

주속비는 풍속 대비 반지름과 터빈의 회전속도의 곱으로 식(2)와 같이 정의한다.

$$\lambda = \frac{R\omega}{V_{wind}} \quad (2)$$

여기서 P_{blade} 는 풍력 터빈에 유입되는 전력[W], A 는 블레이드의 회전 단면적[m²], ρ 는 공기밀도[kg/m³], V_{wind} 는 풍속[m/sec], $C_p(\lambda)$ 는 블레이드의 출력계수로 주속비 λ 의 함수로 식(3)과 같이 근사화 하였다.[1]

$$C_p = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \quad (3)$$

식(3)의 복잡성을 줄이기 위해 λ_i 는 식(4)로 정의한다.

$$\lambda_i = \frac{\lambda}{1 - 0.0035\lambda} \quad (4)$$

$\lambda - C_p$ 의 관계 그래프를 MATLAB을 이용하여 아래의 그림 2와 같이 나타내었다.

수식적으로 C_p 가 최대값을 가질 때 최대 과위를 발생시킨다. 위의 C_p 는 0.48의 최대값을 가진다.

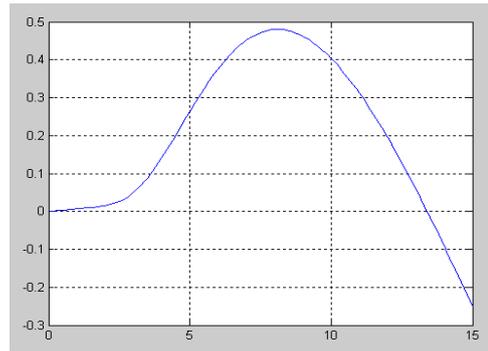


그림 2 $\lambda - C_p$ 관계곡선
Fig. 2 $\lambda - C_p$ characteristic curve

2.3 발전기(PMSG)와 정류기의 모델링

PMSG는 터빈에 의해 회전함으로써 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환시키는 역할을 한다. PMSG의 회전속도는 교류전압과 비례 관계에 놓인다.

$$V_{rec,out} = k \omega_g \quad (5)$$

이 때, k 는 양수이고, ω_g 로 미분하게 되면 식(6)으로 표현할 수 있다.

$$\frac{dV_{rec,out}}{d\omega_g} > 0 \quad (6)$$

3상 다이오드 정류기에서의 입출력 전압관계는 식(7)와 같다.

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_g \quad (7)$$

2.4 부스트 컨버터

Boost 타입의 DC-DC 컨버터는 저전압을 승압하는 효과를 가지며, 이는 기본적으로 1개의 스위칭 소자를 이용하여 구현할 수 있다. 입력전압과 출력전압의 관계는 식(8)으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{V_{boost,output}}{V_{boost,input}} = \frac{1}{1 - D} \quad (8)$$

$$D = 1 - \frac{V_{boost,input}}{V_{boost,output}} \quad (9)$$

식(9)의 관계식을 D 에 대해 미분하게 되면 식(10)과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$\frac{dD}{dV_{boost,input}} = -\frac{1}{V_{boost,out}} < 0 \quad (10)$$

2.5 인버터 알고리즘

인버터는 AC 상용 주파수로 변환하여 계통에 에너지를 전달해주는 역할을 한다. 이를 위한 제어 블록도는 아래와 같다.[1]

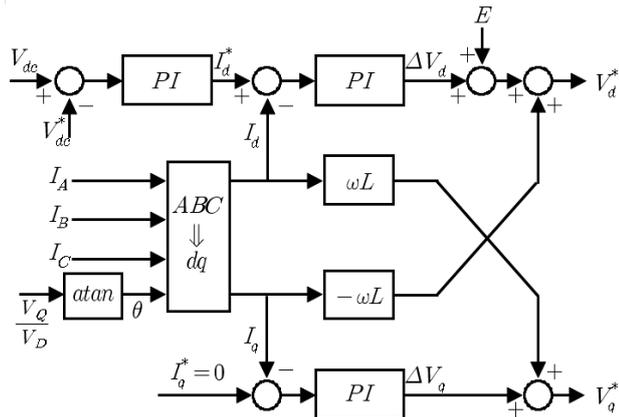


그림 3 DC링크 전압 제어 인버터 제어 블록도
Fig. 3 Block diagram of dc-link voltage control in the inverter

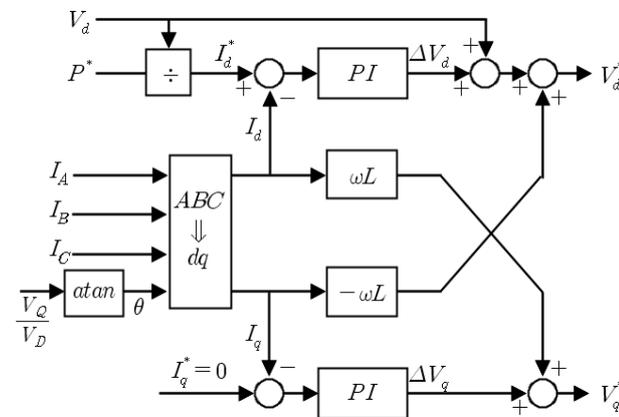


그림 4 역률 제어 인버터 제어 블록도
Fig. 4 Block diagram of power factor control in the inverter

위의 그림 3은 기존의 Back to back 컨버터 시스템의 DC링크 전압 제어 알고리즘이고 그림 4는 제안한 Boost 컨버터 시스템의 역률 제어 알고리즘이다. Boost 컨버터는 입력 파워를 최적으로 제어하기 때문에 듀티는 가변된다. 이때 인버터 앞단의 DC링크 전압은 듀티에 의하여 가변되기 때문에 기존 인버터 알고리즘으로 구현할 경우 출력 DC링크 전압은 고정되어지며 입력단의 DC링크 전압이 결정되어 발전기의 가변속 시스템에 위배되는 결과를 낳는다. 그러므로 인버터 알고리즘을 재고할 필요가 있으며 제안한 인버터

알고리즘은 듀티에 의해 가변되어도 Boost 컨버터의 입력측 파워를 연산하는 과정을 통해 제한한 인버터는 Boost 컨버터로부터 출력되는 파워를 계통으로 모두 전달하는 알고리즘을 적용함으로써 터빈, 발전기로부터 발생한 파워를 계통에 전달하게 된다. 결과적으로 기존의 DC링크를 제어하는 PI 제어가 제거되기 때문에 시스템을 제어하기 용이해진다.

계통측의 V_d 는 Parks Transform에 의해 일정한 값을 가지며 Boost 컨버터로부터 발생한 파워 P^* 를 V_d 로 나눈셈 연산을 하게 되면 I_d^* 값을 산출할 수 있고 실제 전류 I_d 를 PI 제어함으로써 최종적인 V_d^* 를 얻을 수 있다.

3. MPPT제어

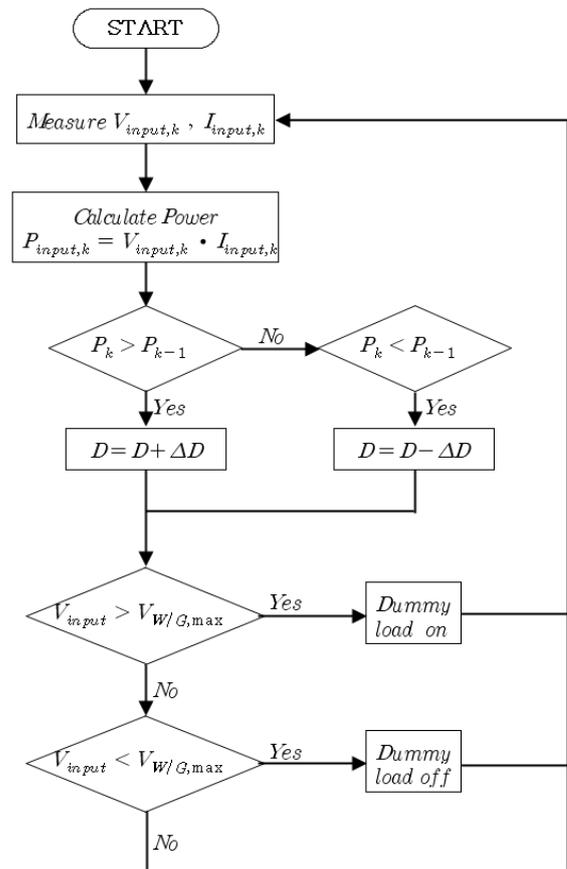


그림 5 MPPT제어 알고리즘의 순서도
Fig. 5 Flow chart of the proposed MPPT control algorithm

MPPT를 위해 터빈의 특성곡선을 바탕으로 앞에서 정의한 수식들을 이용하되 연쇄법칙을 적용한다.[7]

$$\frac{dP_{out}}{d\omega_g} = \frac{dP_{out}}{dD} \cdot \frac{dD}{dV_{boost,input}} \cdot \frac{dV_{boost,input}}{d\omega_g} = 0 \quad (12)$$

식(12)는 터빈특성곡선을 통해 최대 파워지점의 기울기가 0인 것을 나타낸다. 그리고 우항에서 식(6), (10)을 대입하게 되면 최종적으로 듀티를 조절함에 의해 파워를 조절할 수 있는 결론을 내릴 수 있다. 대입하여 정리하면 식(6)이 양수, 식(10)이 음수이므로 식(13)으로 정의할 수 있다.

$$\frac{dP_{out}}{d\omega_g} = - \frac{dP_{out}}{dD} = 0 \quad (13)$$

그림 5의 알고리즘은 Boost 컨버터의 입력측 전압과 전류를 통해 파워를 연산하고 파워의 변화에 따라 듀티를 증가, 또는 감소를 시킴으로써 최적점으로 MPPT를 수행한다. 그림 3 MPPT 알고리즘에서 선행되어야 할 부분은 초기 파워포인트 위치를 알아야 한다는 점이다. 먼저 파워를 계산하고 듀티를 임의로 증가시켰을 때의 파워를 계산하여 파워의 증감 여부에 따라 최대 파워포인트를 기준한 위치를 알 수 있다. 이 부분이 결정되고 난 후에 순서도에 입각하여 MPPT를 수행하게 된다. 그리고 MPPT 수행은 정격 내에서 이루어져야 하며 부스트 컨버터의 비선형 구간의 진입을 방지한 한계점을 고려해야 한다.[4]

4. 시뮬레이션

제안된 MPPT 알고리즘을 검증하기 위하여 PSIM 시뮬레이터를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

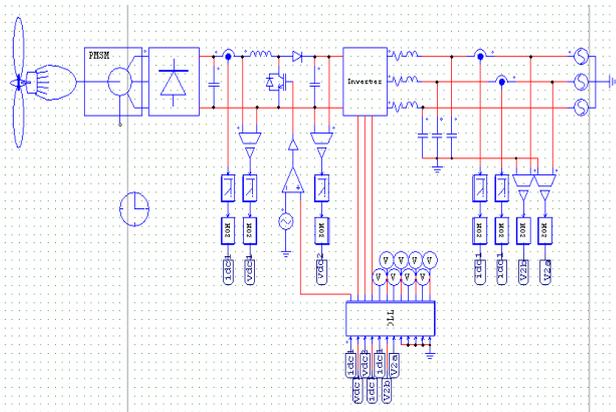


그림 6 PSIM으로 구현한 시뮬레이션 블록도
Fig. 6 Simulation block diagram realized by the PSIM

Boost 컨버터의 입력측 전압과 전류의 리플을 필터링 하기 위하여 cut off frequency를 300Hz로 설정했다. 이 지점에서의 파워정보는 duty와 인버터를 제어하기 위한 중요한 요소가 된다. 블레이드측 터빈은 시뮬레이터를 이용하되 외부에서 직접 풍속을 인가시킴으로써 파워가 주입된다. 하지만 최초 터빈의 속도는 0이기 때문에 주속비를 연산할 경우 무한대 값이 산출되기 때문에 강제적으로 회전시켜줄 필요가 있다. 시뮬레이터 파형들의 가장 앞부분은 강제적으로 회전시켰을 경우의 과도상태이다.

표 1 시스템 회로 정수

Table 1 System parameters

영구자석형 동기발전기	
고정자 저항	0.2[Ω]
직축 인덕턴스	10[mH]
횡축 인덕턴스	28[mH]
극쌍수	6
역기전력상수	147[V _{pk} /krpm]
회전자 회전관성	0.00179
부스트 컨버터	
인덕턴스	2[mH]
캐패시턴스	2200[μF]
계통측 정수	
선로 저항	0.3[Ω]
선로 인덕턴스	5[mH]
선로 캐패시턴스	10[μF]

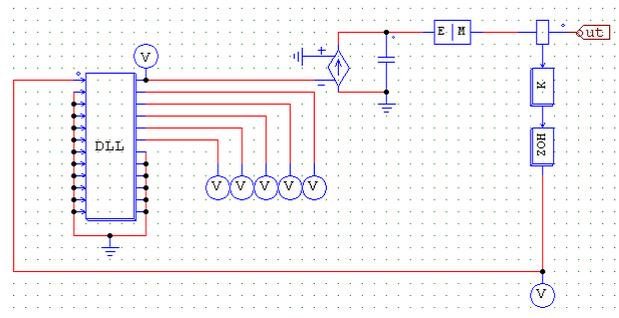


그림 7 풍력 터빈모델

Fig. 7 Wind turbine model

터빈부에서 만약 Boost 컨버터의 제어가 수행되지 않았을 경우의 파형을 시뮬레이션 했을 경우 아래와 같이 최적 파워 및 최적Cp가 이루어지지 않는다. 그렇기 때문에 Boost 컨버터의 듀티 제어가 이론적으로 최적점을 추종하는 시스템에 이용될 수 있다는 것이다.

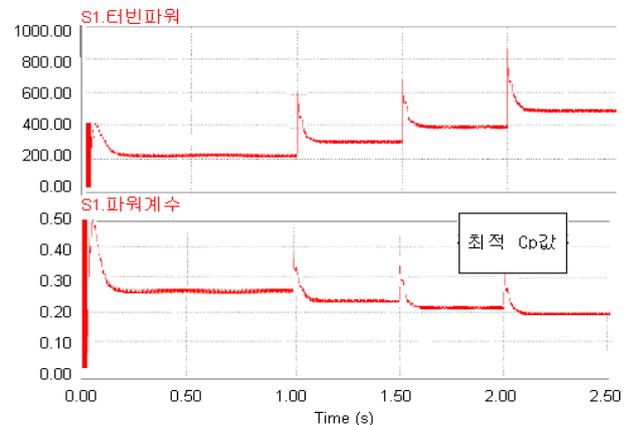


그림 8 듀티 미제어 시 터빈 파워, Cp

Fig. 8 Wind turbine power and Cp at fixed duty ratio control

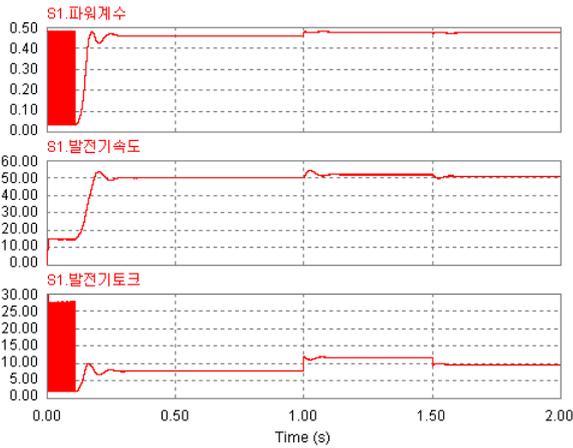


그림 9 MPPT 제어 시 터빈 파워, Boost 컨버터 입력 파워, 인버터 출력 파워

Fig. 9 Wind turbine power, boost converter input power, and inverter output power at proposed MPPT control

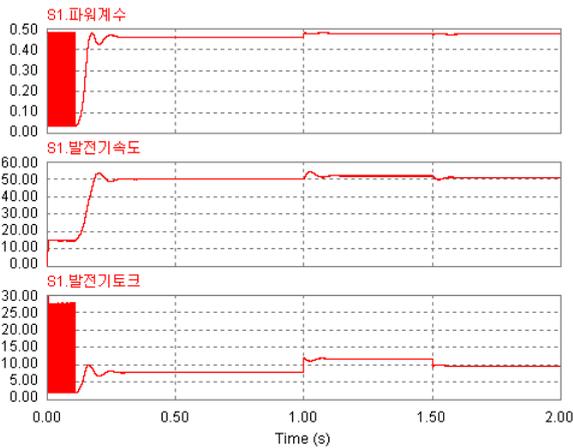


그림 10 MPPT 제어 시 파워계수, 발전기 속도, 발전기 토크

Fig. 10 Power coefficient, generator velocity, and torque at proposed MPPT control

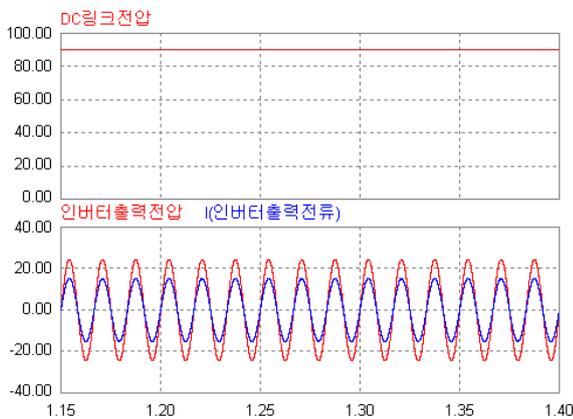


그림 11 MPPT 제어 시 DC링크 전압과 인버터 출력 전압, 전류

Fig. 11 DC-link voltage, output voltage and current in the inverter with proposed MPPT control

시뮬레이션 결과 MPPT 미제어 시에는 약 45%의 효율을 보였고 입력풍속의 차이가 벌어질수록 그 효율은 더욱 떨어진다. 풍속을 가변하였을 때 터빈부에서는 최적 C_p 인 약 0.48(48%)을 유지함으로써 최대파워가 발생했고 최종적인 인버터에서 파워를 계산한 결과 약 92%의 효율을 보였다. 이를 통해 제안된 알고리즘을 적용하였을 경우 듀티가 가변됨으로써 MPPT가 수행하고 있음을 입증하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 풍속 정보와 발전기 속도 정보를 이용하지 않고 Boost 컨버터의 듀티 스위칭을 이용한 MPPT 알고리즘을 제안하였고 그 적합성을 테스트하였다. 특히 센서리스는 가격 부담을 줄이고 시스템의 견실성, 보수성, 사용환경에 따른 부담을 없앨 수 있다는 장점을 가지고 있다. 더욱이 제안된 알고리즘을 통해 MPPT를 수행함으로써 효율적인 운용이 가능하다는 점에서 경제성을 극대화할 수 있다.

감사의 글

본 논문은 인하대학교 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 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, 130 - 135 vol 21, March 2006
- [2] Kun Han, Guo-zhu Chen, "A Novel Control Strategy of Wind Turbine MPPT Implementation for Direct-drive PMSG Wind Generation Imitation Platform", Power Electronics and Motion Control Conference, 2009. IPEMC '09. IEEE 6th International, 2255 - 2259, May 2009
- [3] Mingxing Zhou, Guangqing Bao, Youmin Gong, "Maximum Power Point Tracking Strategy for Direct Driven PMSG", Power and Energy Engineering Conference (APPEEC) 2011 Asia-Pacific, March 2011
- [4] R. Esmaili, L. Xu, D. K. Nichols, "A New Control Method of Permanent Magnet Generator for Maximum Power Tracking in Wind Turbine Application", Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE, 2090 - 2095 vol. 3, June 2005
- [5] Kenji Amei, Yukichi Takayasu, Takahisa Ohji, Masaaki Sakui, "A Maximum Power control of Wind Generator System Using a Permanent Magnet Synchronous Generator and a Boost Chopper Circuit", Power Conversion Conference, 2002. PCC Osaka, 1447 - 1452 vol. 3, August 2002
- [6] Seung-Ho Song, Shin-il Kang, Nyeon-Kun Hahm,

"Implementation and Control of Grid Connected AC-DC-AC Power Converter for Variable Speed Wind Energy Conversion System", Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2003. APEC '03. Eighteenth Annual IEEE, 154 - 158 vol. 1, February 2003

- [7] Jae Sin Choi, Rag Gyo Jeong, Jae Hwa Shin, Cheon Kyu Kim, Young Seok Kim, "New Control Method of Maximum Power Point Tracking for Tidal Energy Generation System", Electrical Machines and Systems, 2007. ICEMS, 165 - 168, October 2007

저 자 소 개



김 영 석 (金榮石)

1951년 6월 11일생. 1977년 인하대 전기 공학과 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



김 도 윤 (金度潤)

1982년 6월 14일생. 2009년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 2011년 동 대학원 전기 공학과 졸업(석사)

Tel : 032) 860-7397

E-mail : blesswind@naver.com



이 준 민 (李俊旻)

1982년 6월 16일생. 2009년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 2011년 동 대학원 전기 공학과 졸업(석사)

Tel : 032) 860-7397

E-mail : wnsalsldi0@naver.com