

## 풍력 발전기 시뮬레이터를 이용한 풍속 변동 모의 및 발전기 속도 기준값 결정에 관한 연구

오정훈 정병창 송승호 류지윤  
전북대학교 차세대 풍력발전 연구센터 유니슨(주)\*

### Generator Speed Control Algorithm with Variable Wind Speed Emulation Using Wind Turbine Simulator

Jeong-Hun Oh Byoung-chang Jeong Seung-Ho Song Ji-Yoon Ryu

Advanced Wind Power System Research Center Chonbuk National University UNISON Co. Ltd\*

**Abstract** - In this paper, on the subject of a speed control wind turbine, the type of wind speed reference decision between conventional MPPT tracking speed control and MPPT with LPF(Low Pass Filter) speed control algorithm are introduced and its performances are compared using a model based on MATLAB Simulink, and to get more realistic output data, the stored wind data as its wind speed input from 30kW wind power system in Buan, Haechang is used.

#### 1. 서 론

대체 에너지에 대한 관심이 높아지고 있는 오늘날 세계 각국에서는 여러 가지 차세대 에너지원의 개발에 관심을 가지고 있다. 대표적으로 태양광, 연료 전지, 풍력 발전 등이 주목받고 있는 에너지원으로 떠오르고 있으며 대체 에너지 개발에 후발주자로서 시작한 우리나라에서도 현재 많은 기관에서 연구중에 있으나 아직은 상용화 단계에 이르지 못하고 있는 실정이다.

그중에서 풍력 발전의 경우 현재 국내에서 개발연구가 활발히 진행되고 있고 몇몇 단지에 수입품이나 시작품으로써 풍력 발전기가 세워지고 있고 운행중인 상태이다. 그러나 운행중 풍력 발전기에 대한 여러가지 문제점이 서서히 나타남으로 인하여 국내 실정에 맞는 풍력 발전기 및 그에 따른 제반 사항 개발이 대두되고 있다. 이러한 관점에서 현재 진행중인 풍력 발전기의 효율적인 발전제어를 위한 여러 가지 테스트에 있어 제어 대상을 실제 풍력 발전기로 하는 것은 공간, 시간, 비용적 측면에서 어려움이 있다. 이에 따라 제어 대상을 모의하기 위한 방법 중 하나로 기존의 M-G 세트를 사용함으로써 블레이드의 토포크를 모의하거나 완성을 모의하여 실제 풍력 발전기의 특성을 구현하는 것이다. 또한 풍력 발전기 효율을 높이기 위해서는 바람의 파워를 최대한 이용하는 최대 파워 출력은 기본적인 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 제어에 입각한 블레이드의 속도 제어 기법을 사용해야만 한다.

본 논문에서는 Matlab Simulink를 이용하여 풍력 발전기의 블레이드 특성을 모의하고 실제 현장에 불었던 바람의 속도를 저장하고 입력 데이터로 사용하여 바람의 패턴에 따른 풍속 변동 모의 및 기본적인 MPPT 속도 제어 방식과 사용된 MPPT 방식에 저역 통과 필터를 포함한 제어기의 출력 특성에 관한 시뮬레이션을 수행하여 보았고 비교 및 분석하였다.

#### 2. 풍력 발전기의 특성

##### 2.1 풍력 발전기

풍력 발전기가 바람으로부터 받아들이는 에너지는 다음과 같은 식으로 표현된다.[3][4]

$$\text{주속비 } \lambda = \frac{\omega_m \cdot R_{blade}}{V} \quad (1)$$

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

$$\text{토포크 } T_{blade} = \frac{P_{blade}}{\omega_m} \quad (3)$$

단,  $P_{blade}$  : 블레이드 입력에너지[W]

$A$  : 블레이드 회전 단면적 [ $m^2$ ]

$\rho$  : 공기밀도 [ $kg/m^3$ ]

$V$  : 바람속도 [m/s]

$\lambda$  : 주속비(TSR, Tip Speed Ratio)

$\omega_m$  : 회전속도 [rad/s]

$R$  : 블레이드의 길이 [m]

$C_p$  : 출력계수

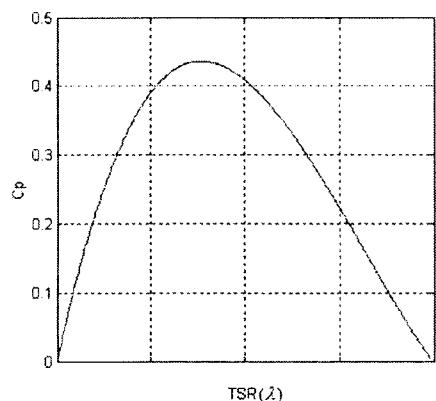


그림 1. 주속비에 따른 출력계수  $C_p$  곡선

위 식에 따라 입력되는 풍속에 있어서 출력파워는 풍속의 3승과 출력계수  $C_p$ 에 비례하며 블레이드에 인가되는 토포크는 파워를 블레이드의 속도로 나눈 것이다. 그림 1은 주속비에 따른 출력계수  $C_p$ 를 나타낸다.

##### 2.1.1 MPPT 제어

대부분의 풍력 발전 시스템의 출력이 최대가 되기 위해서는 그림 1에서 보는 바와 같이  $C_p$ 가 최대값을 갖는 일정 주속비를 유지하도록 다음과 같은 식을 만족하는 제어를 수행하여야 한다.

$$\omega_m^* = \frac{\lambda_{opt} \cdot V}{R_{blade}} \quad (4)$$

즉, 풍속의 변화에 따라 운전 속도 기준값을 변경함으로써 최대 전력을 생산할 수 있는 점을 지속적으로 유지시키도록 제어해야 하는 것이다.

### 2.1.2 MPPT + LPF 제어

MPPT 속도 기준값 제어에 저역 통과 필터를 추가함으로써 속도 기준값의 잦은 변동을 저지하는 방향으로 설정한 방식이다. MPPT 속도 출력에 1차 저역 통과 필터를 사용하였다.

$$\omega_{rm\_mppt\_lpf}^* = \frac{w_c}{s+w_c} \times \omega_{rm\_mppt}^* \quad (5)$$

단,  $\omega_{rm\_mppt}^*$  : MPPT 속도 기준 제어값[rad/s]

$w_c$  : 1차 저역 통과 필터 차단 주파수[rad/s]

$\omega_{rm\_mppt\_lpf}^*$  : 저역 통과 필터를 통과한 속도 기준 제어값[rad/s]

## 2.2 관성 모의

실제 블레이드와 같은 관성이 큰 물체는 실제 실험을 하기에 여러 가지 측면에 있어서 곤란한 경우가 많다. 따라서 다음과 같이 관성 모의 기능을 이용하여 기존의 M-G 세트를 활용하며 관성이 작은 직류기로 관성이 큰 블레이드를 모의할 수 있다.[5]

실제 블레이드를 사용하는 경우

$$T_{blade} = (J_B + J_G) \frac{dw_{blade}}{dt} + T_G \quad (6)$$

전동기를 사용하는 경우

$$T_{DCM} = (J_M + J_G) \frac{dw_m}{dt} + T_G \quad (7)$$

블레이드와 전동기가 동일한 특성을 보인다고 가정하면 다음과 같다.

$$w_{rm} = w_{blade}$$

$$T_{DCM} = T_{blade} - (J_B - J_M) \frac{dw_m}{dt} = T_{blade} - T_{comp} \quad (8)$$

단,  $T_{blade}$  : 블레이드 토오크[N·m]

$T_G$  : 발전기 토오크[N·m]

$T_{DCM}$  : DC 모터 토오크[N·m]

$J_B$  : 블레이드 관성[kg·m<sup>2</sup>]

$J_M$  : DC 모터 관성[kg·m<sup>2</sup>]

$J_G$  : 발전기 관성[kg·m<sup>2</sup>]

$w_{blade}$  : 블레이드 회전 속도[rad/s]

$w_{rm}$  : 발전기 회전 속도[rad/s]

위 (8)식을 사용하여 관성 보상팀  $T_{comp}$ 를 보상해 줌으로써  $T_{blade}$ 를 DC 전동기를 사용하여 모의할 수 있다. 여기서 실제 실험 중 미분항에 노이즈가 다소 들어오므로 상황에 따라 적절한 필터 기능이 필요하다.

### 2.2.1 블레이드의 관성계산

관성  $J$ 를 가진 회전체를 토오크  $T_{eR}$ 로 가속할 때 정격 각속도  $\omega_{rmR}$ 에 도달하는데 소요되는 시간을 시정수로 표현하면 다음과 같다.[1][2]

$$H = \frac{J \cdot \omega_{rmR}}{T_{eR}} \quad (9)$$

특정 블레이드의 관성에 관한 정보가 없을 경우 유사한 풍력 발전기 관성 시정수를 이용하여 용량에 따라 식(10)을 사용, 다음과 같이 관성 시정수 추측이 가능하다.

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{\sqrt{S_1}}{\sqrt{S_2}} \quad (10)$$

여기서  $H$ 는 시간에 관한 파라미터이므로 사용할 관성  $J$ 로 변환해 주기 위해 다음 식을 적용한다.[2]

$$J = \frac{H \cdot (N_{gb} \cdot PP)^2 \cdot S \cdot 10^6}{(2\pi f)^2} \quad (11)$$

단,  $H$  : 소요 시간[sec]

$f$  : 전원 주파수[Hz]

$N_{gb}$  : 기어비

$PP$  : pole pair

$S$  : 풍력 발전기 용량[MVA]

본 논문에서는 30kW 풍력발전기의 블레이드 관성 시정수를 약 1.3sec로 하였고 발전기의 관성 시정수를 0.144sec로 하였다.

## 3. 시뮬레이션

### 3.1 시뮬레이션

그림2와 그림3과 같이 Matlab Simulink 기반 하에 풍력발전 시뮬레이션을 수행하였다. 모델로 부안 해창의 30kW급 풍력 발전기를 선정하였고 풍속 데이터로는 부안군 해창에 설치되어있는 30kW급 풍력 발전기를 운전하면서 저장한 실제 풍속 데이터를 파일로 받아 그대로 구현하도록 하였으며 평균적인 바람의 세기로 180초 가량 일정 구간을 선택하여 시뮬레이션을 수행하였다. 기어비는 시뮬레이션 편의상 1:1로 설정하였고 시뮬레이션은 기존의 MPPT 속도 기준값 제어 알고리즘에 추종하는 방식과 MPPT+LPF 속도 기준값 제어 방식의 제어방식을 사용하여 두 결과를 비교하였다.

#### 3.1.1 시뮬레이션 모델

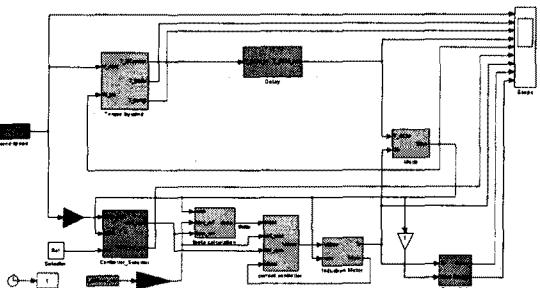


그림 2. 전체 시뮬레이션 블록도

그럼 2는 시뮬레이션에 사용한 모델의 블록 다이어그램을 보여준다. 전체 시뮬레이션 블록도로써 풍속 입력을 받아들이고 받아들인 풍속 입력을 풍력 발전기 블레이드 입력 토오크와 발전기 속도 기준값을 산정하는데 사용하도록 되어있다.

그림 3은 관성 모의 기능을 가진 블레이드 입력 토스크 계산부의 블록다이어그램을 보여주고 있다. 식(2), (3)과 식(7)의 표현을 Matlab Simulink를 사용하여 구현하였으며 블레이드와 DC전동기의 관성을 정확히 알아야 확실한 관성 모의가 가능하다. 미분항을 구현하는 데는 2차 저역 통과 필터를 사용하였다.

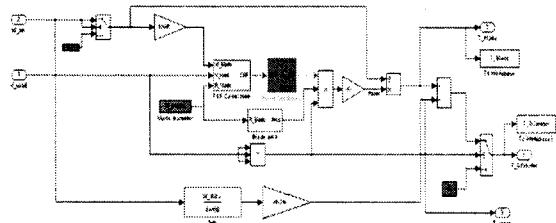


그림 3. 블레이드 모의

표 1은 본 시뮬레이션에 사용한 발전기의 파라미터를 보여준다. 30kW급 풍력 발전기를 대상으로 한 발전기 모델 파라미터이다.

표1. 발전기 모델 파라미터

Parameters	Value
Rated output	30[kW]
Rated voltage	220[V]
Rated current	70[A]
Rated speed	1835[rpm]
PP(Pole Pair)	2
Rs	0.044[Ω]
Rr	0.0252[Ω]
Ls	13.45[mH]
Lr	13.37[mH]
Lm	12.9[mH]
JG	0.122[kg·m <sup>2</sup> ]

그림 4와 그림 5는 각 제어 방식에 따라서 시뮬레이션을 수행한 결과를 보여준다. 각 그림4와 그림 5의 첫 번째 파형은 실제 풍속을 파일로 받아 시뮬레이션 풍속 입력 데이터로 사용한 풍속 파형이고 두 번째 파형은 속도 기준값에 대해서 발전기가 추종한 속도 파형이며 세 번째 파형은 그때 발전한 순시 파워를 적분한 발전기 파워 출력량을 말한다.

그림 4는 MPPT 속도 기준값 제어방식을 구현한 풍력 발전기 시뮬레이션의 출력 파형이고 그림 5는 MPPT 속도 기준값 제어방식의 속도 기준값에 저역통과필터를 추가하여 속도 기준값의 변동을 일정 주파수 한도 내에서 억제한 제어 방식을 사용한 풍력 발전기 시뮬레이션의 출력 파형이다.

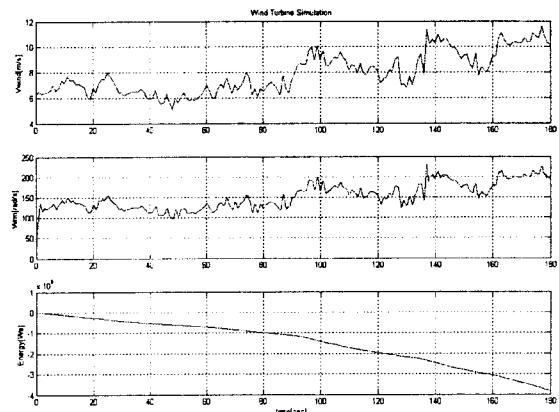


그림 4. MPPT 속도 기준값 제어에 따른 시뮬레이션 결과

실제 MPPT 속도 기준값 제어 방식을 그대로 따라가는 것이 이상적이겠으나 풍속 변동에 따라 최고 Cp값을 유지하기 위해 속도 제어기가 발전기를 최적 속도에 맞추어 따라간다 하여도 발전기에 비해 블레이드의 커다란 관성으로 인하여 속도 기준값에 따라 즉시 반응하기가 어렵고 급격한 풍속 변화율에 즉각적으로 반응하기 곤란하며 큰 관성체를 급격히 속도제어를 하기에는 블레이드와 발전기 축에 기계적인 무리가 해가진다고 추정하여 MPPT 속도 기준값 제어 방식의 속도 기준값의 격차로 변화를 막기 위해 속도 제어 출력단에 저역 통과 필터를 설치함으로써 발전기 속도 제어를 MPPT 속도 기준값 방식과 같이 기준값에 즉각 따라가기보다 전체 관성 속도 제어 기준값에 대해 천천히 따라가도록 설정하였다.

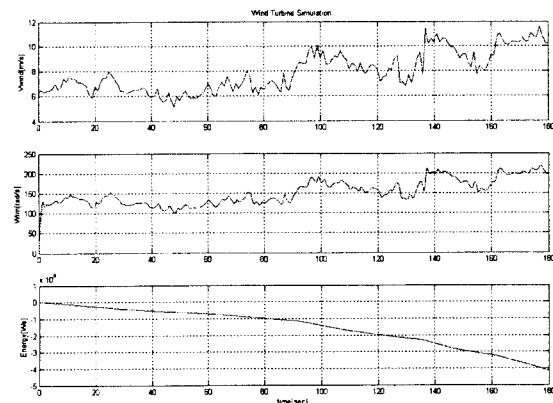


그림 5. MPPT+LPF 속도 기준값 제어에 따른 시뮬레이션 과정

시뮬레이션에서 MPPT 속도 기준값 제어한 그림 4에  
비하여 MPPT+LPF 속도 기준값 제어한 그림 5가 속도  
기준값에 따른 발전기 속도 변화가 완화되었으며 180초  
동안 발전된 전력량이 약 7%정도 향상되었다는 것을 시  
뮬레이션을 통해서 확인하였다.

표 3. 제어방식에 따른 출력량 변화(180sec동안)

제어방식	발전량[W <sub>s</sub> ]
기존의 MPPT	3,816,100
MPPT+LPF	4,140,500

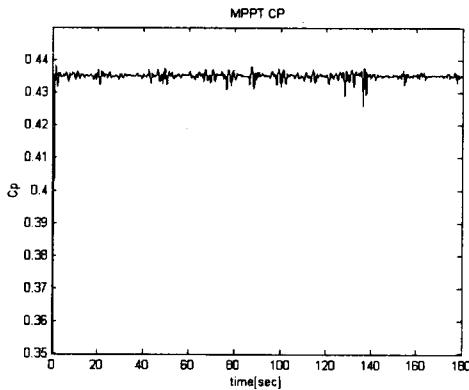


그림 6. MPPT 속도 기준값 제어에 따른 Cp 추종

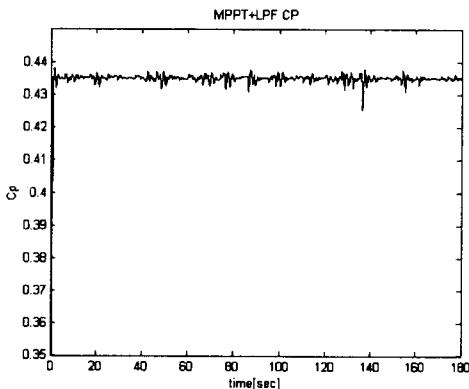


그림 7. MPPT+LPF 속도 기준값 제어에 따른 Cp 추종

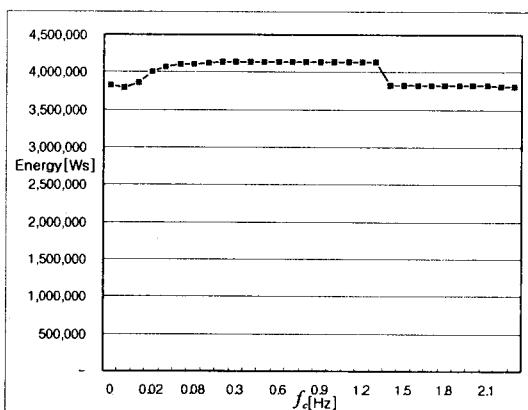


그림 8.  $f_c$ 변동에 따른 발전 에너지 변화량

그림 6과 7는 시뮬레이션 조건에 따른 Cp 추종 과정을 나타낸다. 그림 6은 입력된 바람 데이터에 대해서 MPPT 속도 기준값 제어에 따라 제어된 Cp 추종 과정이며 그림 7는 MPPT+LPF 속도 기준값 제어에 따른 Cp 추종 과정이다. 그림 6에서 Cp 추종 과정은 그림 7 보다 더욱 민감한 반응을 보이고 있으며 출력 파워 면에서도 낮은 효율을 보여준다. 이는 그림 8에서 보는 바와 같이 MPPT 속도 기준값 제어를 위해서 지속적으로 최고 Cp 값만을 쫓는 것보다는 속도 추정 반응을 MPPT 제어보다 특히 풍속이 증가했다가 감속하는 경우 풍속의 변동을 그대로 따라서 발전기를 가속, 감속시키는 것보

다 일정 주파수 이하의 움직임만을 따로도록 적당한 차단 주파수의 저역통과 필터를 사용한 MPPT가 출력전력을 더 많이 생산할 수 있다는 것을 보여주었다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 DC 전동기를 사용하여 관성을 보상함으로 큰 관성의 블레이드를 모의하고 실제 바람의 데이터를 입력받아 사용하여 MPPT 속도 제어 알고리즘에 입각한 기본 제어 기법과 발전기 속도 기준값에 저역 통과 필터를 사용하여 발전기 속도의 MPPT 속도 제어 알고리즘을 융용한 기법을 시뮬레이션 및 소개·비교하였다. MPPT+LPF를 사용한 경우 기본적인 최적효율제어 기법보다는 일정 주파수 내에서 출력 효율이 개선된 결과를 보여주었다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] Ezzeldin S. Abdin, wilson Xu, "Control Design and Dynamic Performance Analysis of a Wind Turbine-Induction Generator Unit", IEEE TRANS On ENERGY CONVERSION, VOL. 15, NO. 1, MARCH 2000
- [2] A.G.Gonzalez Rodriguez, M.Burgos Payan, "PSCAD Based Simulation of the Connection of A Wind Generator to the Network", IEEE Power Tech Proceedings, VOL. 4 page 6, 2 001
- [3] 구성영, 이동준, "풍력발전용 농형유도발전기의 최대출력제어", 2001 대한전기학회 춘계 학술대회 논문지, 288-292, 2001.
- [4] 정병창, 송승호, 노도환, 김동용, "풍력 터빈 모의 실험을 위한 가변 토크크 입력형 시뮬레이터", 대한 전기학회 논문지, Vol 51, No. 8, pp. 467-474, 2002.
- [5] 정병창, 정세종, 송승호, 노도환, 김동용, "가변관성 모의 기능을 가진 풍력 발전기 시뮬레이터의 제어 알고리즘", 2002 대한전기학회 학술대회, pp. 170-173, 2002.

본 연구는 산업자원부, 에너지관리공단의 지원에 의해 수행된 과제임(과제번호 : 2001-N-WD01-P-(3-030))