

## 가변관성 모의 기능을 가진 풍력발전기 시뮬레이터의 제어 알고리즘

정병창, 정세종, 송승호\*, 노도환\*, 김동용\*  
 전북대학교 전자정보공학부      전북대학교 차세대 풍력발전 연구센터\*

### Control Algorithm for Wind Turbine Simulator with Variable Inertia Emulation

Byoung-Chang Jeong, Se-Jong Jeong, Seung-Ho Song\*, Do-Hwan Rho\*, Dong-Yong Kim\*  
 Chonbuk National Univ.      Advanced Wind Power System Research Center\*

**Abstract** - A variable speed wind turbine simulator is designed and implemented for the simulation of wind power generation system. The control algorithm decides the shaft torque delivered to generator taking into consideration the wind speed, the generator rpm, and the rotor blade inertia. It is shown that the proposed control algorithm can emulate the dynamic behavior of actual wind turbine through simulations and experimental.

#### 1. 서 론

본 연구의 목적은 풍력 발전 시뮬레이터에 토오르크를 입력하기 위한 토오르크 소스를 설계/구현하는 것이다. 풍력 발전 시스템은 크게 블레이드, 발전기, 그리고 인버터-컨버터등 세부분으로 구성된다. 그중에서 블레이드는 풍력 발전 시뮬레이터를 제작할 때, 제작비용과 유지 비용, 그리고, 연구에 걸리는 시간을 절약하기 위해서 토오르크 소스로 대체할 필요가 있다. 본 논문에서는 토오르크 소스를 제어하기 위한 새로운 알고리즘을 제안하였다.

풍력 발전 시뮬레이터에서 블레이드를 사용할 경우 발전 시스템의 용량에 따라 블레이드를 제작해야 하고, 원하는 풍속 패턴을 구현하기 위해서 대형 풍동 실험실을 설치해야 하는 등 많은 비용이 들어간다. 그러나 전기기기를 사용하여 블레이드를 대체할 경우 시설유지비와 용량에 따른 블레이드 제작비용을 감소시킬 수 있고, 원하는 풍속 패턴에 따른 동작도 간단하게 구현할 수 있다.

블레이드의 토오르크를 구현하기 위한 방법으로 직류 전동기를 사용하는 방법이 사용되고 있다.[1] 그러나, 블레이드를 사용한 경우와 직류 전동기를 사용한 경우의 관성차를 고려하지 않았기 때문에 실제 블레이드를 사용한 시뮬레이터의 동작을 구현할 수는 없다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 직류 전동기와 블레이드의 관성차를 고려한 새로운 토오르크 소스 제어 알고리즘을 제안하였다. 그리고, 제안한 알고리즘을 적용하여 풍력 발전 시뮬레이터를 구성하였으며, 실험을 통하여 제안한 알고리즘의 동작 특성을 확인하였다.

#### 2. 블레이드의 모델링 및 구현

##### 2.1 블레이드의 모델링

블레이드는 이동하는 공기가 가지고 있는 에너지를 기계적 회전 에너지로 변환하는 역할을 수행한다. 블레이드에서 입력되는 전력은 풍속과 블레이드의 회전 속도의 관계에 따라서 달라지며, 풍속과 블레이드의 관계를 주속비(TSR : Tip Speed Ratio)  $\lambda$  라고 한다. 주속비는 다음과 같이 주어진다.[2]~[5]

$$\lambda = \frac{\omega_{blade} R_{blade}}{V_{wind}} \quad (1)$$

$\omega_{blade}$ 는 블레이드의 회전속도(rad/sec),  $R_{blade}$ 는 블레이드의 반지름(m),  $V_{wind}$ 는 풍속(m/sec)를 의미한다.

그리고, 바람이 가지고 있는 전체 에너지중에서 블레이드가 받아들이는 에너지의 비율을 출력 계수(Power Coefficient)  $C_p$ 라고 하며 출력 계수는 주속비에 대한 함수로 정의할 수 있기 때문에  $C_p(\lambda)$  라고 표현하기도 한다. 출력 계수는 그림 1과 같이 주속비에 따라서 가변한다.

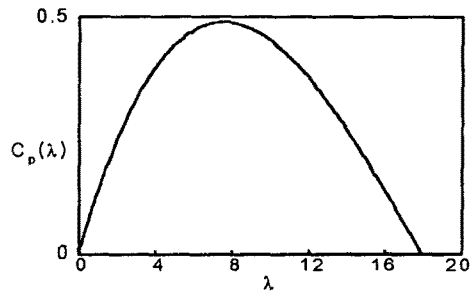


그림 1. 출력 계수와 주속비

블레이드에서 변환되는 에너지  $P_{wind}$ 는 다음과 같다.

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

$A$ 는 블레이드의 회전 단면적( $m^2$ ),  $\rho$ 는 공기의 질량으로 약  $1.25(kg/m^3)$ 이다. 이때 바람에 의해서 블레이드에 입력되는 토오르크  $T_{wind}$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.[1]

$$T_{wind} = \frac{P_{wind}}{\omega_{blade}} \quad [Nm] \quad (3)$$

##### 2.2 직류기에 의한 블레이드의 구현

기존의 풍력 발전기 시뮬레이터에서는 블레이드에 의한 토오르크를 구현하기 위하여 (3)식을 사용하여 직류 전동기의 토오르크 기준값을 결정하였다. 그러나 전동기를 사용하여 풍력 터빈의 동작을 모의하는 경우 회전부 회전부 관성이 실제 블레이드보다 매우 작아서 작은 토오르크 변동에도 발전기 속도가 급격하게 변화하는 등 실제 동특성과 다른 문제점이 있다.

전동기를 사용한 경우 블레이드의 동작특성을 고려하기 위하여 그림 2와 같이 두 가지 경우를 생각하자. 블레이드를 발전기에 연결할 때 중속을 위해서 기어비 1:N 인 기어를 사용할 경우 1차축 블레이드를 2차축으로 환

산하고 등가관성을 구하면  $\frac{1}{N^2}$  배가 된다. 그러나, 간단하게 살펴보기 위하여 기어비가 1:1인 이상적인 기어를 가정하였다. 먼저 블레이드를 사용한 경우 시스템의 전체 관성은 블레이드의 관성  $J_B$ 와 발전기의 관성  $J_G$ 의 합이 되어 블레이드 토오크  $T_b$ 와 발전기의 토오크  $T_g$  회전속도는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$T_b = (J_B + J_G) \frac{d\omega_{blade}}{dt} + T_g \quad (4)$$

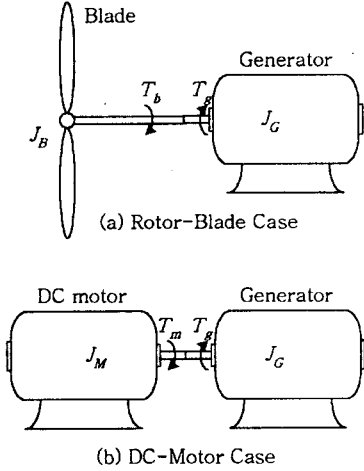


그림 2. 시뮬레이터의 관성과 토오크  
(a) 블레이드를 사용한 경우  
(b) 직류 전동기를 사용한 경우

그러나 (b)와 같이 직류 전동기를 사용한 경우 시스템은 전체 관성은 전동기 관성  $J_M$ 과 발전기 관성의 합이 되어 전동기의 토오크  $T_m$ 와 발전기의 토오크는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$T_m = (J_M + J_G) \frac{d\omega_{motor}}{dt} + T_g \quad (5)$$

$\omega_{motor}$ 는 전동기를 사용할 경우의 시스템의 회전속도 [rad/sec]

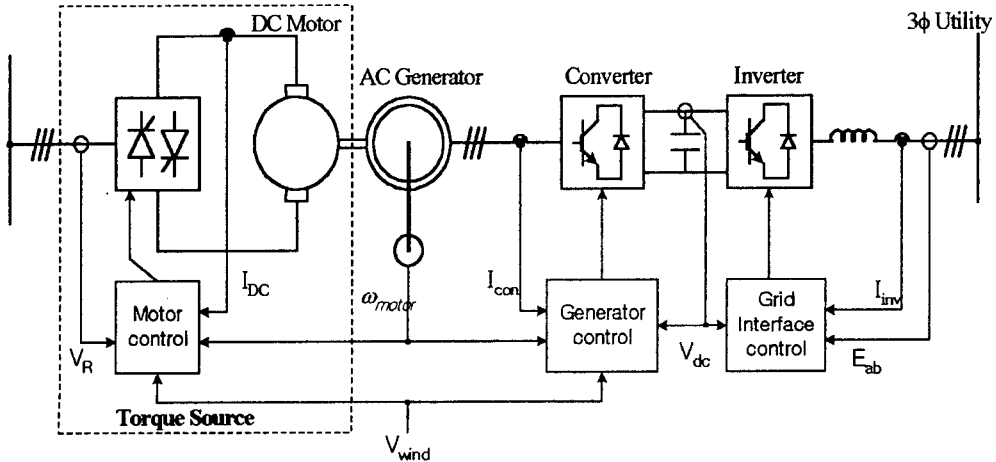


그림 4. 풍력 발전 시뮬레이터의 개략도

만일 전동기를 사용한 시뮬레이터를 블레이드를 사용한 시뮬레이터와 같은 속도 특성을 보이도록 제어하려면 (4)식과 (5)식의 차로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$T_m = T_b - (J_B - J_M) \frac{d\omega_{motor}}{dt} = T_b - T_{comp} \quad (6)$$

전동기에 공급해 주어야 하는 토오크는 본래 블레이드에서 입력되는 토오크로부터 관성차이 만큼을 가속/감속 하는데 필요한 토오크를 빼거나/더해서 (6)식과 같이 계산할 수 있다. 그리고, (6)식을 프로그램으로 구현할 경우, 전동기의 회전속도 측정값에 잡음이 포함된 경우 계산이 어려우므로 잡음의 영향을 제거할 수 있는 프로그램 기법이 요구되며, 실제 블레이드의 속도 가변 특성을 모의하기 위해서는 높은 동특성이 요구된다.[7]

전동기가 구현해야 할 토오크는 식(3)과 (6)에 의하여 구할 수 있으며 그림 3과 같이 구현된다. 이때, 토오크를 결정하기 위한 입력 변수로는 풍속과 블레이드의 회전속도를 사용한다.

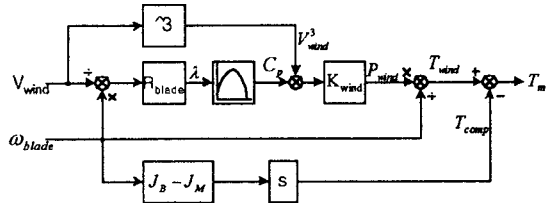


그림 3. 전동기 토오크 기준값 설정

속도 미분의 실제 구현에 있어서는 속도 측정값의 잡음에 의한 영향을 최소화하고 동특성을 높이기 위하여 다음과 같은 2차 미분 필터를 사용하였다.

$$\hat{\omega}_{motor} = \frac{K_1^2 s}{s^2 + K_1 K_2 s + K_1^2} \omega_{motor} \quad (7)$$

### 3. 시뮬레이션

제한한 알고리즘에 대하여 시뮬레이션을 수행하였으며 전체 시스템의 구성은 그림 4와 같고, 사용한 파라미터는 다음과 같다.

시뮬레이션에서 전동기에 의한 동특성을 비교하기 위하여 컨버터에서 발전기측으로 입력되는 전력을 차단하였다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

블레이드	직류 전동기	유도 발전기
R=1.6m	P=5500W	P=3000W
Cpmax=0.4896	V=220V	V=220V
J <sub>B</sub> = 0.6	ω <sub>rate</sub> =1750rpm	p=4
	J <sub>M</sub> = 0.03	J <sub>G</sub> = 0.018

블레이드의 관성이 전동기의 관성과 같은 경우 즉, 블레이드의 큰 관성을 고려하지 않은 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 그림 5에서 보여주고 있다. 풍속이 그림 5의 (a)와 같이 4m/sec에서 10m/sec로 변동할 경우, 블레이드에 의한 입력 토오크,  $T_{blade}$ 는 풍속과 시스템의 회전속도의 관계에 의하여 (b)와 같이 추정할 수 있다. 그리고, 블레이드와 전동기의 관성차를 고려하지 않았으므로 관성 보상을 위한 토오크값,  $T_{comp}$ 는 (c)와 같이 0이며, 추정된 입력 토오크를 전동기의 토오크 제어 기준값,  $T_m$  (d)로 사용하고 있다. 따라서 발전기와 연결된 전동기의 회전속도는 (e)와 같이 변하고 있다.

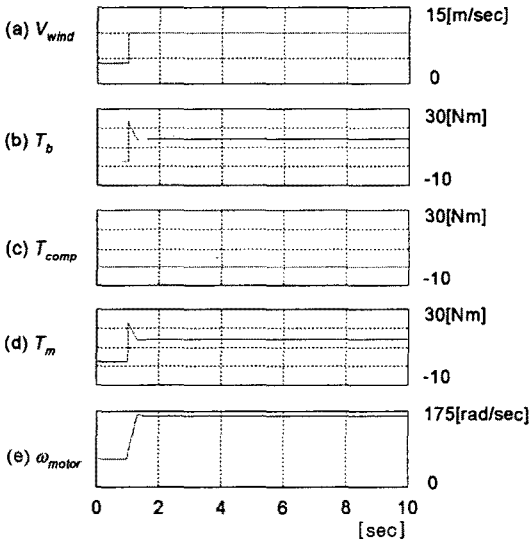


그림 5. 제어 알고리즘 시뮬레이션 결과 ( $J_B = J_M$ )

- (a) 풍속  $V_{wind}$
- (b) 블레이드 토오크  $T_b$
- (c) 보상 토오크  $T_{comp}$
- (d) 전동기 토오크  $T_m$
- (e) 전동기 회전속도  $\omega_{motor}$

블레이드의 관성이 전동기의 관성과 다른 것을 고려한 경우의 시뮬레이션 결과를 그림 6에서 보여주고 있다. 그림 5와 동일한 조건에서, 블레이드의 관성이 전동기 관성보다 20배 큰 경우 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 5에서 보여주고 있는 기존의 방법과는 달리 블레이드의 큰 관성을 모의하기 위하여 관성차 보상 토오크,  $T_{comp}$ 를 (c)와 같이 추가하였다. 회전속도가 변동하는 구간에서 블레이드의 큰 관성을 모의하기 위하여 보상 토오크를 계산하고, 블레이드의 입력 토오크 추정값에서 보상 토오크를 뺀 나머지를 전동기의 토오크 제어 기준값으로 사용한다. 큰 관성을 모의하기 때문에 (e)와 같이 회전속도는 서서히 증가한다.

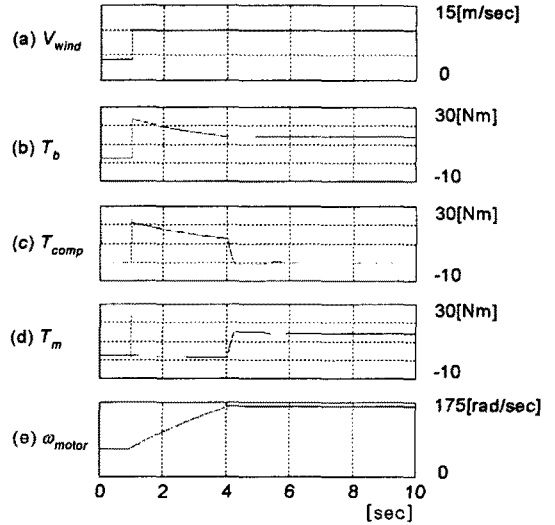


그림 6. 제어 알고리즘 시뮬레이션 결과 ( $J_B = 20J_M$ )

- (a) 풍속  $V_{wind}$
- (b) 블레이드 토오크  $T_b$
- (c) 보상 토오크  $T_{comp}$
- (d) 전동기 토오크  $T_m$
- (e) 전동기 회전속도  $\omega_{motor}$

#### 4. 시뮬레이터의 설계 및 구현

제안한 알고리즘을 적용하여 직류 전동기를 제어하는 시뮬레이터를 제작하였으며, 블레이드의 관성을 고려하지 않은 경우와 관성을 고려한 경우를 비교하였다. 시뮬레이터의 구성 및 파라미터는 시뮬레이션과 같다.

블레이드의 관성을 고려하지 않은 경우에 대한 실험 결과를 그림 7에서 보여주고 있다.

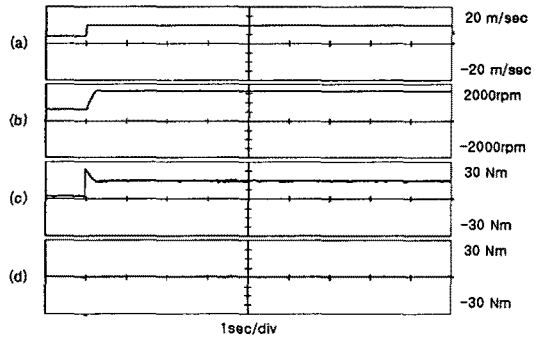


그림 7. 제어 알고리즘 실험 결과 ( $J_B = J_M$ )

- (a) 풍속  $V_{wind}$
- (b) 전동기 회전속도  $\omega_{motor}$
- (c) 블레이드 토오크  $T_b$
- (d) 보상 토오크  $T_{comp}$

풍속이 (a)와 같이 가변될 때, 블레이드의 입력 토오크 추정값을 (c)에서 보여주고 있으며, 블레이드의 관성과 전동기의 관성을 같게 설정하였으므로 보상 토오크는 (d)와 같이 항상 0이다.

블레이드의 관성을 전동기의 20배로 설정하고 그림 7과 동일한 실험 조건에서 실험한 결과를 그림 8에서 보여주고 있다.

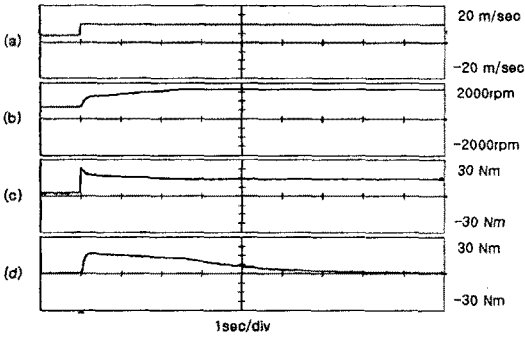


그림 8. 제어 알고리즘 실험 결과 ( $J_B = 20J_M$ )

- (a) 풍속  $V_{wind}$  (b) 전동기 회전속도  $\omega_{motor}$   
 (c) 블레이드 토크  $T_b$  (d) 보상 토크  $T_{comp}$

블레이드의 입력 토크 추정값이 (c)와 같이 변동할 때, 블레이드의 큰 관성을 모의하기 위한 보상 토크는 (d)와 같게 된다. 즉 전동기에 인가되는 토크의 기준값은 (c)와 (d)의 차로 회전속도가 가변하는 구간에서는 작은 값이 인가된다. 그 결과 (b)와 같이 회전속도가 서서히 증가하여 블레이드의 큰 관성이 반영되었음을 확인할 수 있다.

### 3. 결 론

풍력 발전 시스템의 연구에서 연구 기간 및 비용을 절약하기 위해서 직류 전동기로 블레이드에 의한 토크 입력을 모의하고 있다. 그러나, 블레이드의 관성과 전동기의 관성이 다른 것을 고려하지 않았기 때문에 전동기로는 회전속도가 변동하는 구간에서 실제 블레이드와 같은 회전속도 특성을 구현하지 못하였다.

본 논문에서는 블레이드의 관성과 전동기의 관성이 다른 것을 고려한 전동기 제어 알고리즘을 제안하였으며, 제안한 알고리즘을 적용하여 시뮬레이터를 구성하고 전동기의 관성과 블레이드의 관성이 같거나 다른 경우에 대하여 각각 시뮬레이션과 실험을 수행하였다.

제안한 알고리즘을 사용할 경우 보다 정밀하게 다양한 크기의 블레이드의 동특성을 손쉽게 시뮬레이션 할 수 있는 장점이 있다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Shibashis Bhowmik, Rene Spee, Johan H. R. Enslin, "Performance Optimization for Doubly Fed Wind Power Generation Systems", IEEE Tr. Industry Application, Vol. 35, No. 4, pp. 949~958, 1999.
- [2] 구성영, 이동춘, "풍력발전용 농형유도발전기의 최대출력제어", 2001대한전기학회 춘계 학술대회 논문지, 288-292, 2001.
- [3] 김용현, 김일환, "풍력발전을 위한 이중역자 유도기의 센서리스 제어", 전력전자학회논문지, 2000, Vol. 5, No.5, 451-458.
- [4] 정병장, 송승호, 노도환, 김동용, 김영민, 임종연, " 풍력 터빈 모의 실험을 위한 가변 토크 입력형 전동기-발전기 제어 시스템 제작 및 실험", 2001대한전기학회 추계 학술대회 논문지, 346-348, 2001.
- [5] S. Müller, M. Deicke, Rik W. De Doncker, "Adjustable Speed Generators for Wind Turbines based on Doubly-fed Induction Machines and 4-Quadrant IGBT Converters Linked to the Rotor", IAS 2000. Conference Record, Vol. 4, 2249 -2254, 2000.
- [6] Z. Hakan Akpolat, Greg M. Asher, Jon C. Clare,

"Dynamic Emulation of Mechanical Loads Using a Vector-Controlled Induction Motor-Generator Set", IEEE Tr. Industrial Electronics, Vol. 46, No. 2, pp. 370-379, 1999.

- [7] Seung-Ho Song, Seung-Ki Sul, "A New Tension Controller for Continuous Strip Processing Line", IEEE Tr. Industry Applications, Vol. 36, No. 2, pp. 633~639, 2000.

본 연구는 (00-지역-03)한국전력공사지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행되었음.