

풍력발전기 회전자 블레이드의 타워효과를 고려한 풍차 시뮬레이터의 구현

오정훈 정병창 송승호
전북대학교 차세대 풍력발전 연구센터

Wind Turbine Simulator Implementation Considering Tower Effect of Rotor Blade

Jeong-Hun Oh Byoung-chang Jeong Seung-Ho Song
Advanced Wind Power System Research Center Chonbuk National University

Abstract - To get more realistic wind turbine torque characteristic, it is important to consider many parameters about wind turbine system. One of them is the tower effect which is occurred when a blade is bypassing the wind turbine tower and influences shaft torque fluctuation. In this paper, to emulate the similar torque performance of wind turbine, the wind turbine simulation and experiment with torque fluctuation by blade tower effect are implemented and verified. The simulation model is based on MATLAB Simulink.

1. 서 론

앞으로 석탄, 석유 에너지 고갈 및 대체 에너지 보급에 관심을 갖고 있는 현재, 풍력 발전 에너지 개발은 무공해 자원으로써 국내 현실에 맞추어 볼 때 실용성이 매우 뛰어나며 기존의 화력, 원자력을 대체할 새로운 에너지 자원으로 각광받고 있다. 국내에서는 자체 기술 개발 및 도입 기술을 이용하여 강원도, 제주도 등 몇몇 지역에서 상업 운전중이거나 각 연구 단체마다 곳곳에 시험기가 설치 및 운전 중에 있는 실정이다.

풍력발전기는 바람으로부터 받은 에너지를 블레이드를 통해 동력으로 전환하여 축을 돌리게 되고 이를 발전기에 전달하게 되는데 블레이드가 타워를 지날 때마다 블레이드의 개수, 형상 및 타워의 형태에 따라서 토오크가 감소하는 현상이 일어나며 이를 '타워효과'라 한다. 이 현상은 회전체의 특성상 지속적으로 반복되며 발전기에 주기적인 토오크 리플을 가져오는 결과를 낳고 발전기에서 인버터로 흐르는 전류 역시 주기적인 리플을 가져오게 되며 전체 시스템에 영향을 미치게 된다.

본 연구에서는 기존의 M-G 세트를 사용하여 블레이드의 토오크를 모의하고 관심을 모의하여 실제 풍력발전기의 토오크 특성을 구현하였으며 블레이드가 타워에 의해 미치는 주기적인 토오크 변동의 특성을 추가한 모델을 시뮬레이션 및 실험을 통해 구현하였다.

2. 풍력 발전기의 특성

2.1 풍력 발전기의 토오크 출력

풍력 발전기의 입력 에너지는 식 (1)과 같이 모의된다.[1]

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

식 (1)의 출력 계수 C_p 는 주속비에 관한 함수이며 주속비는 다음 식 (2)와 같다.

$$\lambda = \frac{R_{blade} \cdot \omega_{blade}}{V_{wind}} \quad (2)$$

그림 1은 주속비에 관한 C_p 계수를 표현하는 그래프이다. 여기서 C_p 는 피치가 고정된 단일 값을 사용하였다. 식 (1)과 식 (2)를 통하여 파워를 구하면 그때 블레이드의 속도로 나눔으로써 식 (3)과 같이 토오크를 구할 수 있다.

$$T_{blade} = \frac{P_{blade}}{\omega_{blade}} \quad (3)$$

- 단, P_{blade} : 블레이드 입력에너지[W]
- A : 블레이드 회전 단면적[m²]
- ρ : 공기밀도[kg/m³]
- V_{wind} : 바람의 속도[m/s]
- λ : 주속비(TSR, Tip Speed Ratio)
- ω_{blade} : 블레이드 회전속도[rad/s]
- R : 블레이드의 길이[m]
- C_p : 출력계수

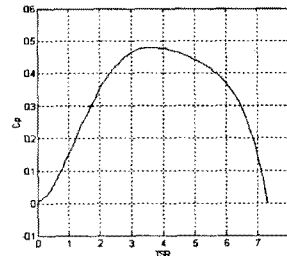


그림 1. 주속비에 따른 C_p 곡선

2.2 Tower Effect

풍력 발전기의 블레이드가 타워를 스쳐 지나갈 때 바람의 속도가 감소하는 현상이 일어나는데 이는 출력 토오크에 영향을 미치며 출력되는 토오크는 블레이드의 개수와 비례하는 주기적인 리플을 가지게 되고 리플 성분의 크기는 블레이드의 형상 및 타워 형태와 관계가 있다. 그림 2에서 보는 바와 같이 풍력 발전기의 블레이드가 타워 위를 스치고 지나갈 때 바람이 약해지는 영향으로 인하여 회전 토오크가 순간적으로 줄어들어써 발전기 축 토오크 및 발전량에 영향을 미치게 된다. 식 (4)는 블레이드에서 전달되는 토오크의 크기를 나타내는 식이다. T_0 는 바람으로부터 블레이드에 전달되는 토오크이며 T_{∞} 는 블레이드가 타워를 스치고 지나가며 감소되는 토오크 량이며 블레이드 개수, 회전 속도에 따라 주기적으로 영향을 미치는 항이다.[4]

$$T_{blade} = T_0 - \frac{1}{z} [T_{se}(zW_{blade}^d)] \quad (4)$$

T_{blade} : 블레이드 토크[N·m]
 T_0 : 바람으로부터 블레이드 축에 전달되는 토크[N·m]
 T_{se} : 타워 효과에 의해 감소되는 토크[N·m]
 W_{blade} : 블레이드 회전 속도[rad/s]
 z : 블레이드 개수

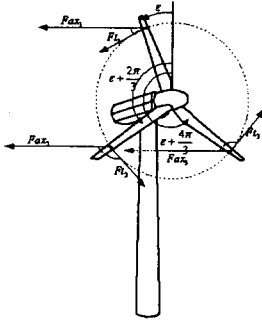


그림 2. 풍력 발전기 형상

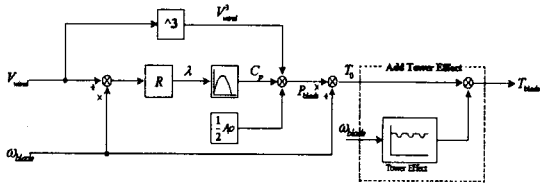


그림 3. 타워 효과를 포함한 블레이드 모델 개념도

그림 3은 바람으로부터 블레이드 축에 전달된 토크 T_0 에서 타워 효과에 의해 감소되는 토크 T_{se} 만큼 빼내어 최종적으로 발전기 축까지 전달되는 토크를 산출하는 개념도를 보여준다.

2.3 관성 모의

실제 블레이드와 같은 관성이 큰 물체를 직접 가지고 실험을 하기는 공간적, 비용적인 면에 있어 곤란한 경우가 많다. 따라서 아래와 같이 관성 모의 기능을 이용하여 기존의 M-G 세트를 활용, 관성이 작은 전동기로 관성이 큰 블레이드를 모의할 수 있다.[2]

실제 블레이드를 사용하는 경우 블레이드 토크는 식 (5)과 같이 표현

$$T_{blade} = (J_B + J_G) \frac{dw_{blade}}{dt} + T_G \quad (5)$$

전동기를 사용하는 경우 토크는 식 (6)과 같이 표현

$$T_M = (J_M + J_G) \frac{dw_{rm}}{dt} + T_G \quad (6)$$

블레이드와 전동기가 같은 속도로 회전하고 동일한 특성을 보인다고 가정하면 식 (7)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 w_{rm} &= w_{blade} \\
 T_M &= T_{blade} - (J_B - J_M) \frac{dw_{rm}}{dt} \\
 &= T_{blade} - T_{comp} \quad (7)
 \end{aligned}$$

단, T_{blade} : 블레이드 토크[N·m]

T_G : 발전기 토크[N·m]

T_M : 전동기 토크[N·m]

J_B : 블레이드 관성[kg·m²]

J_M : 전동기 관성[kg·m²]

J_G : 발전기 관성[kg·m²]

w_{blade} : 블레이드 회전 속도[rad/s]

w_{rm} : 발전기 회전 속도[rad/s]

위 (7)식을 사용하여 관성 보상값 T_{comp} 를 보상해 줌으로써 T_{blade} 를 전동기를 사용하여 모의할 수 있으며 그림 4는 그때의 개념도를 보여준다. 여기서 LPF는 식 (7)의 미분항에 노이즈 방지를 위한 필터를 사용한 것을 말한다.

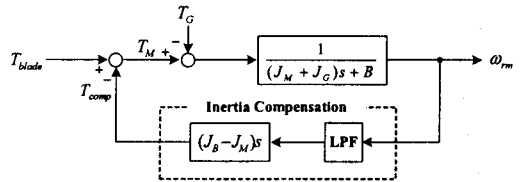


그림 4. 관성 모의 기능 개념도

2.4 블레이드 모델 구현

그림 5는 바람의 입력 V_{wind} 와 발전기 속도 w_{rm} 을 입력받은 후 식 (1), (2), (3)에 의해서 토크를 계산하여 바람에서 블레이드 축으로 전달되는 토크를 얻을 수 있고 식 (4)에 의해서 타워 효과에 의한 토크 감소량을 빼냄으로써 발전기로 전달되는 블레이드 토크를 얻을 수 있으며 식 (7)을 이용하여 관성 보상 기능을 사용, 블레이드를 전동기로 대체하여 토크 T_M^* 을 발전기에 전달하는 동작을 보여준다.

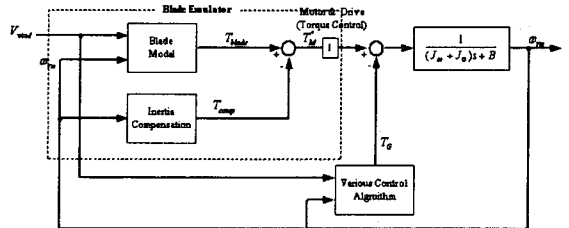


그림 5. 관성 보상을 포함한 블레이드 토크 출력 개념도

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션

시뮬레이션은 Matlab Simulink를 사용하여 수행하였다. 그림 6은 전체 시뮬레이션 블록도를 보여준다. 바람의 속도를 입력받아 블레이드 모델을 돌리며 구성된 제어기에 따라 다양한 제어 알고리즘을 수행할 수 있게 구성하였다. 바람의 속도 입력부터 TSR, C_p 계산, 파워 계산 및 토크 발생, 제어기의 지령, 전류 제어기, 발전기 토크 전달로 인한 전력의 출력까지 포함한 전체 모델을 시뮬링크를 사용하여 구현한 블록도이다.

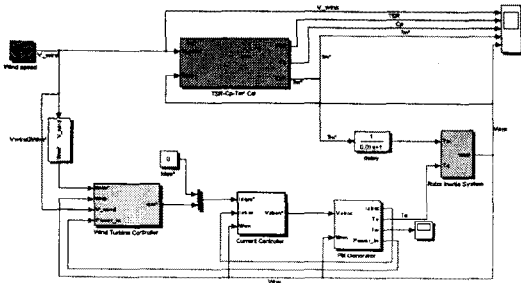


그림 6. 전체 시뮬레이션 블록도

3.2 시뮬레이션 결과

그림 7은 램프 기술을 같은 바람의 입력에 따라 발전기 속도, 블레이드 토크, 전동기 토크, 보상 토크를 보여준다. C_p 를 최대로 유지하기 위해 발전기 속도는 풍속에 비례하도록 제어하였으며 타워 효과에 의해서 시간에 따라 주기적인 토크가 속도 및 토크 크기에 따라 나타나는 것과 관성 모의를 위하여 보상된 토크를 볼 수 있다.

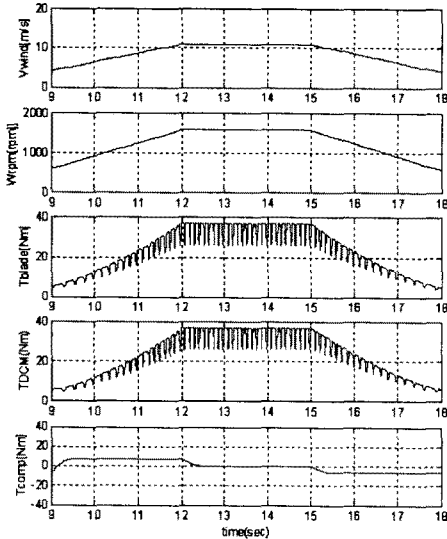


그림 8. 바람에 따른 시뮬레이션 파형

4. 실험

4.1 실험 구성

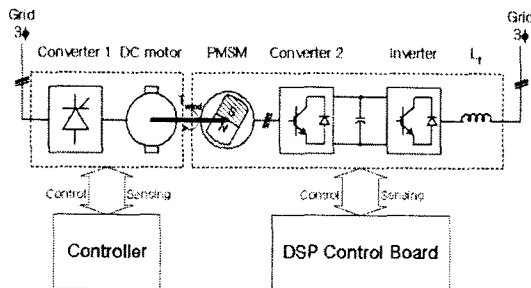
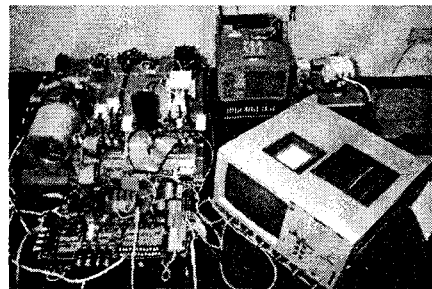


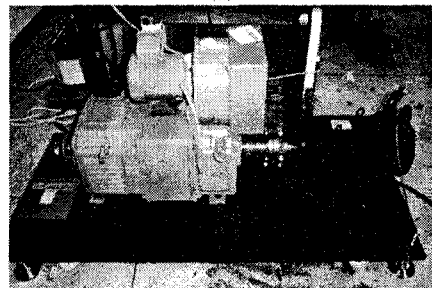
그림 8. 실험 구성도

풍력 발전기 시뮬레이션 결과를 검증하기 위해 실제 M-G세트를 사용하여 실험을 실시하였다. 그림 8은 실험 세트를 꾸며놓은 구성도를 보여준다. 좌측 모듈은 풍력 발전기 블레이드를 모의한 모델로 DC전동기를 사용하여 토오크 모드로 운전하였으며 계통으로부터 3상 전원을 입력받아 사이리스터 컨버터로 제어하였다. 우측 모듈은 DC전동기로부터 입력되는 토크를 영구자석형 발전기로 속도제어하며 발전기용 인버터는 발생하는 전력을 IGBT 컨버터를 통하여 다시 계통에 내보내도록 구성하였다. 상위에 중앙 제어를 두어 DC전동기 측은 바람의 속도와 현재 발전기 속도를 입력받은 후 식 (1), (2), (3)을 통하여 순시 파워와 토오크를 계산하고 계산된 토오크에 맞추어 토오크 지령을 하도록 하였으며 발전기 측은 발전되는 전력 및 토오크 변동에 맞추어 최대 파워 출력을 위한 최적 TSR, C_p 를 유지하기 위해 바람의 속도에 따라 비례 속도 제어를 하며 DC링크단 전압을 일정하게 유지하도록 발전된 전력을 계통에 내보내는 제어를 하게 설정하였다.

그림 9는 실제 실험용 M-G 세트의 사진을 보여주며 표 1, 2는 실험에 사용된 발전기, 인버터 사양을 보여준다.[3]



(a)



(b)

그림 9. (a)제어기, (b)M-G세트

표 1. 영구자석 발전기 사양

Parameters	Value
Rated output	4.4[kW]
Rated voltage	220[V]
Rated current	30[A]
Rated speed	1500[rpm]
PP(Pole Pair)	4
R_s	0.044[Ω]
L_s	1.46[mH]
J_c	0.013[kg·m ²]

표 2. 인버터 사양

Power	10[kW]
Switching Freq.	IGBT 5kHz
Max. dc voltage	495V
Max. ac voltage	285Vrms
Sensors	Hall Effect CT 3EA DC Voltage Sensor 1EA
Protection Function	Arm Short Protection Soft Turn Off Fault Output Latch

4.2 실험 결과

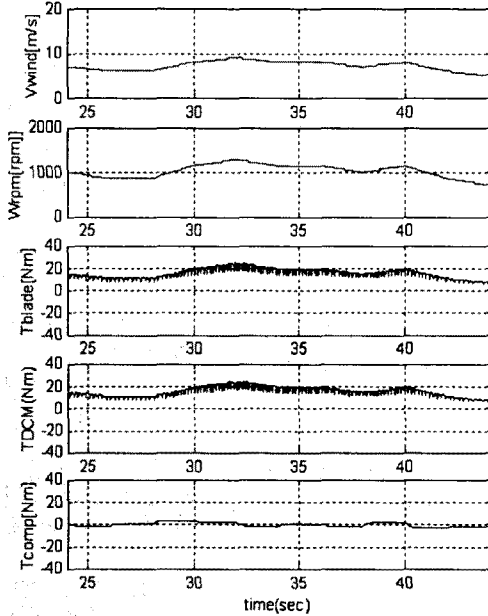


그림 10. 시뮬레이션 결과

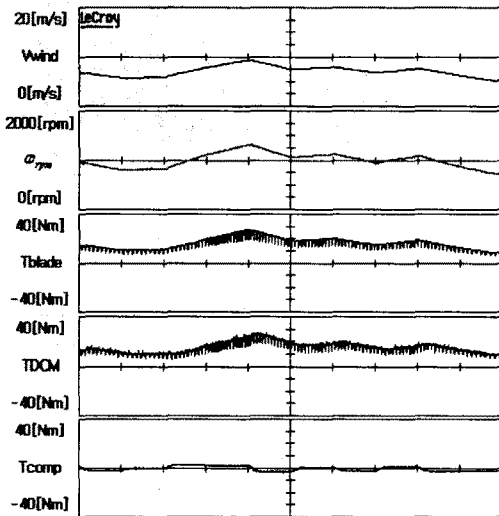


그림 11. 실험 결과

그림 10과 11은 시뮬레이션 및 실험 결과 과정을 보여 준다. 각각 바람의 속도, 발전기 속도, 블레이드 토크와 이를 대신한 DC전동기 토크 및 블레이드와 DC전동기의 관성차를 보정한 관성 보상 토크를 보여주며 바람의 속도에 따라 블레이드 타워 현상에 의한 주기적인 리플이 발생하였음을 보여주고 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 풍력발전기의 특성을 연구하기 위하여 제작중인 풍력발전기 시뮬레이터를 개발하는데 있어 블레이드의 토크 특성 모의의 영향을 미치는 중요한 요소 중 하나인 타워 효과를 포함한 블레이드 토크 특성 시뮬레이션과 실험을 수행하였는데 바람으로부터 에너지를 받은 풍력발전기 블레이드의 토크가 기어박스를 지나 발전기 축까지 전달되는 과정에서 풍력발전기 형상과 블레이드 형태, 개수에 따라 발생하는 토크 리플 성분으로 인하여 발전기에 전달되는 토크 특성이 완만하지 않고 주기적인 리플 성분을 가지는 것을 시뮬레이션과 실험을 통해 충실히 구현하였다.

[참고 문헌]

- [1] 구성영, 이동춘, "풍력발전용 능형유도발전기의 최대출력제어", 2001 대한전기학회 춘계학술대회 논문지, pp. 288-292, 2001.
- [2] 정병창, 정세중, 송승호, 노도환, 김동용, "가변관성 모의 기능을 가진 풍력 발전기 시뮬레이터의 제어 알고리즘", 2002 대한전기학회 춘계학술대회, pp. 170-173, 2002.
- [3] 오정훈, 정병창, 송승호, 류지윤, "풍력 발전기 시뮬레이터를 이용한 풍속 변동 모의 및 발전기 속도 기준값 결정에 관한 연구", 2003 대한전기학회 춘계학술대회, pp. 331-334, 2003.
- [4] Siegfried Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", Kassel University, John Wiley & Sons, Germany

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행된 과제임