

MATLAB 에 의한 풍력발전기 모델에 대한 연구

A Study of Wind Turbine Modeling by MATLAB

*박해균¹, #남윤수², 이종원³, 윤태준⁴

*H. K. Park(vc1001@kangwon.ac.kr)¹, #Y. S. Nam(nys@kangwon.ac.kr)², J. W. Lee³, T. J. Yoon⁴
^{1,3,4} 강원대학교 메카트로닉스공학과, ²한국기계연구원 기계시스템신뢰성연구센터

Key words : Variable Speed Wind Turbines, Control Algorithm, Model Simulation

1. 서론

최근 풍력발전기에 대한 관심이 그 어느 때 보다 높다. 이러한 풍력발전기는 발전기를 지지하는 구조물부터 날개, 발전기까지 비약적인 발전을 이루었다. 또한, 더욱 효율적인 풍력발전을 위해서 제어 구조도 발전하게 되었다. 과거 초기 발전방식은 바람으로부터의 에너지를 다소의 손실을 가지는 수동적인 방식을 가지고 있었다. 하지만 후에 이 방식들은 발전하여, 정속운전 유도발전 방식, 가변속운전 이중여자 유도발전 방식, 가변속운전 동기발전 방식등이 사용되고 있다. 이중 현재 중대형 풍력발전기에서 많이 사용되고 있는 방식은 가변속운전 이중여자 유도발전 방식이 사용되고 있다. 이러한 풍력발전기의 제어 방식에는 실속 제어, 피치제어로 크게 나눌 수 있다. 실속제어에도 피치각을 변화할 수 있는 방식과 변화할 수 없는 방식으로 나눌 수 있다. 최근 중대형 풍력발전기에서는 실속제어의 단점인, 전 풍속영역에서 가장 효율적으로 제어할 수 있는 가변속 피치제어 방식이 주를 이루고 있다. 하지만, 제어시스템은 발전기의 효율과 직접적인 관련이 있기 때문에 공개적인 내용이 많이 존재하지 않고, 풍력발전기 분야의 후발주자인 국내에서는 제어분야에 대한 연구가 활발하게 진행되지 않고 있는 실정이다. 본 논문에서는 이와 같은 가변속 피치제어방식의 제어시스템의 연구를 위한 풍력발전기의 모델링에 대해 다루었다.

본 논문은 네덜란드의 ECN(Energy Research Center of Netherlands)의 연구 자료들을 이용하여 가변속 피치제어 방식의 발전시스템을 MATLAB Simulink 를 이용하여 모델링하고, 모델링 결과에 대해 다룬다.

2. 모델링을 위한 시스템 모델

풍력발전기 모델링을 위해 풍력발전기의 세부 부분을 분류하면 아래와 같이 다섯 부분으로 구분할 수 있다.

1. 로터부의 공기학적 메카니즘
2. 회전부의 메카니즘
3. 타워의 다이내믹 시스템
4. 전기적 변환부분
5. 피치 시스템

위 다섯 부분 중 전기적 변환부분은 발전기에서 제너레이터의 형태와 성능에 관련되고 각 풍속에 대한 설정 토크값에 대해 다루어진다. 본 논문의 시뮬레이션 모델에 이 내용이 포함되어있으나 토크값을 설정 하지는 않는다. 또한, 피치 시스템은 피칭 액츄에이터와 제어방법에 따라 틀려지므로 다루지 않고 추후 제어시스템에 대한 연구 시 다루어진다. 즉, 1,2,3 세 부분의 시스템을 이용하여 바람으로부터 피치각에 따른 로터의 회전 속도 변화의 관계를 살펴 본다. 이제 각 부분에 대한 모델식을 살펴본다.

2.1 로터부의 공기학적 시스템

바람으로부터 로터부에 전달되는 힘은 다음 식 (1)과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} T_a &= C_q(\lambda, \theta) \frac{1}{2} \rho_{air} \pi R_b^3 (V_w - \dot{x}_{nd})^2 \\ F_a &= C_t(\lambda, \theta) \frac{1}{2} \rho_{air} \pi R_b^2 (V_w - \dot{x}_{nd})^2 \end{aligned} \quad (1)$$

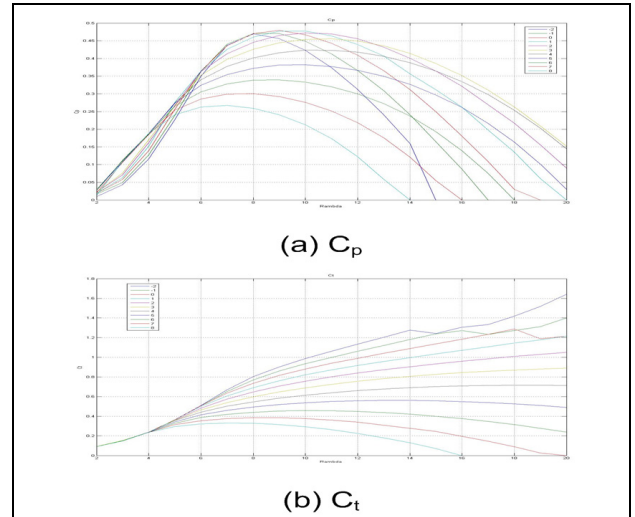


Fig. 1 C_p & C_t value for pitch angle

이때, T_a 는 공기학적인 토크이며, F_a 는 추력이다. 또한, λ , θ , ρ_{air} , R_b , V_w , \dot{x}_{nd} 는 각각 선단속도비, 피치각, 공기밀도, 로터반경, 풍속, 타워 상단의 앞뒤방향 진동 변위이다. C_q 는 토크 계수이고, 출력계수(C_p)를 선단속도비(λ)로 나눈 값이다. 또한, 피치각(θ)은 풍속에 따라 변화속도가 틀려지나, 본 논문의 시뮬레이션에서는 제어 구조가 포함되지 않은 풍력발전기 모델에 대해 다루기 때문에 고정되어 있다고 가정한다. 사용된 C_p , C_t 는 블레이드의 형상과 관련되며 Fig 1(a, b)를 사용하였으며, 보유하고 있는 C_p , C_t 값이 없어 ECN의 자료를 이용하여 구하였다. Fig 1의 값은 각 피치각($-2^\circ \sim 8^\circ$)에 대한 C_p , C_t 값을 나타낸 것이다.

2.2 회전부의 메카니즘 시스템

식 (1)로부터 전달된 토크는 로터의 관성(J_r)과 발전기의 관성(J_g)과 관계되어 식 (2)와 같이 정리 된다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{J_r \cdot J_g}{J_r + J_g} \right) \cdot \ddot{\gamma}_{sh} &= -C_d \cdot \gamma_{sh} - K_d \cdot \dot{\gamma}_{sh} \\ &+ \left(J_g / (J_r + J_g) \right) \cdot (T_a - T_1) + \left(J_r / (J_r + J_g) \right) \cdot T_e \\ J_a \cdot \dot{\Omega}_g &= C_d \cdot \gamma_{sh} + K_d \cdot \dot{\gamma}_{sh} - T_e \end{aligned} \quad (2)$$

이때, γ_{sh} , C_d , K_d , T_1 , T_e , Ω_g 는 각각 토션각, 토션강성, 뎀핑상수, 토크손실, 전기적토크, 발전기속도를 나타낸 것이고, 토션각은 $\gamma_{sh} = \int (\Omega_r - \Omega_g) dt$ 로 정의된다. 또한, 손실은 고정적인 손실과 속도에 관계된 손실로 나눌 수 있다. 이러한 손실은 다음장에서 설명하듯이 없다고 가정한다. 식 (2)를 살펴보면, 식 (1)에서 전달된 토크가 발전기 토션각으로 전달되고, 이는 다시 발전기 속도와 관계되는 것을 알 수 있다.

2.3 타워의 다이내믹 시스템

풍력발전기를 지지하고 있는 타워는 바람과 기타 영향에 의해 흔들리게 된다. 만약 풍력발전기가 해안에 위치한다면 파도의 영향을 받을 것이다. 타워 상단에서 바람과 같은 앞뒤방향의 진동(nodding)은 x_{nd} 로 정의하고, 좌우방

향의 진동(naying)은 x_{ny} 로 정의한다. 이때 타워 상단에 미치는 영향의 관계를 살펴보면 다음 식 (3)과 같다.

$$m_t \cdot \ddot{x}_{nd} + k_t \cdot \dot{x}_{nd} + c_t \cdot x_{nd} = F_{nd}^{top eq} \quad (3)$$

$$m_t \cdot \ddot{x}_{ny} + k_t \cdot \dot{x}_{ny} + c_t \cdot x_{ny} = F_{ny}^{top eq}$$

전달되는 힘은 바람뿐만 아니라 해양풍력발전의 경우, 파도에 의한 영향도 받게 된다. 자세한 내용은 [1]을 참고하기 바란다.

이제 앞서 살펴보았던 식들을 이용한 MATLAB Simulink 모델에 대해 살펴본다. 이때 결과의 도출을 위하여 위의 모델에서 타워 상단의 진동(x_{nd}, x_{ny}), 토크 손실(T_l)과 바람 외의 외력에 의한 힘에 대한 부분은 시뮬레이션 상에 존재하지만 영향을 미치지 않는다고 가정하였다. 이는 후에 제어기 설계 시 추가될 수 있다.

3. MATLAB Simulink 모델

앞 장에서 살펴본 식들을 이용하여 Fig 2 와 같은 MATLAB Simulink 모델을 완성하였다. 각 하위 부분에 대한 내용은 분량상 생략한다. 그리고 이때 사용된 각 변수들은 ECN의 자료 [1]을 참고 하였으며, 가변속 피치제어 시스템에 대한 내용이다. 분량상 Table 1에 간단한 재원만 정리 하였다.

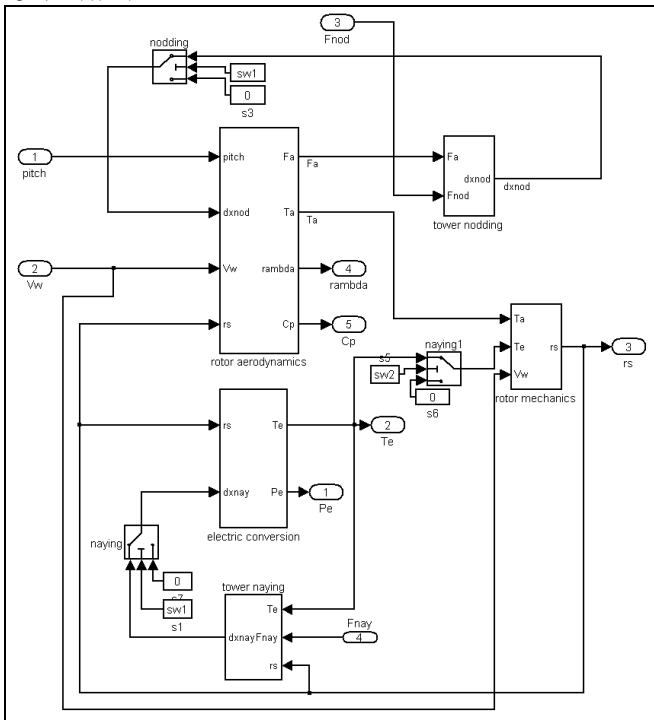


Fig. 2 Model of Windturbine by MATLAB
Table 1 Comparison of measured roughness data

Parameter	Description and Unit	Value
ρ_{air}	Air density [kg/m ³]	1.225
R_b	Rotor radius [m]	46
C_d	Torsion spring constant [N/m]	49558
K_d	Damping constant [kN/m/s]	34.415
m_t	Mass constant [ton]	264.7
k_t	Damping constant [kN/m/s]	5.8
c_t	Spring constant [kN/m]	1280
J_r	Rotor inertia [kgm ²]	12.6×10^6
J_g	Generator inertia [kgm ²]	239
$V_{cut in}$	Cut in wind speed [m/s]	4

정확한 데이터 값을 대입한다면 더욱 정확한 출력값을 구할 수 있을 것이다. 하위 시스템에는 앞서 생략한 내용이 모두 포함 되어 있고, 시스템에 미치는 영향만 없다고 가정하였다.

4. 결론

위와 같은 시뮬레이션 결과는 Fig 3 과 같다. Fig 3(a)는 풍속 15m/s 에서 각 피치각에서 얻을 수 있는 로터의 최대 속도를 나타낸 것이고, Fig 3(b)는 시뮬레이션 시간에 따라 각 피치각도에서의 로터 회전속도를 나타낸 것이다. 컷인 스피드가 4m/s 이므로 컷인 속도 이하의 풍속에서는 로터가 회전하지 않는다. 또한, 저풍속 영역에서 비선형적인 출력이 나타나게 되는데 이는 풍속과 로터 스피드의 관계인 선단속도비(λ)에 따른 출력성능 데이터가 충분히 존재하지 않아 발생하는 문제이다.

이와 같은 결과를 이용하여 중대형 풍력발전기의 제어기 연구에 도움이 되리라 본다. 모델링된 부분과 결과를 얻기 위하여 가정된 부분이 존재하지만 정확한 재원과 값을 알 수 있다면, 그에 따른 응답특성을 살펴볼 수 있고, 이 모델을 바탕으로 중대형 풍력발전기의 가변속 피치제어 시스템에 대한 추가적인 연구를 할 수 있으리라 판단된다.

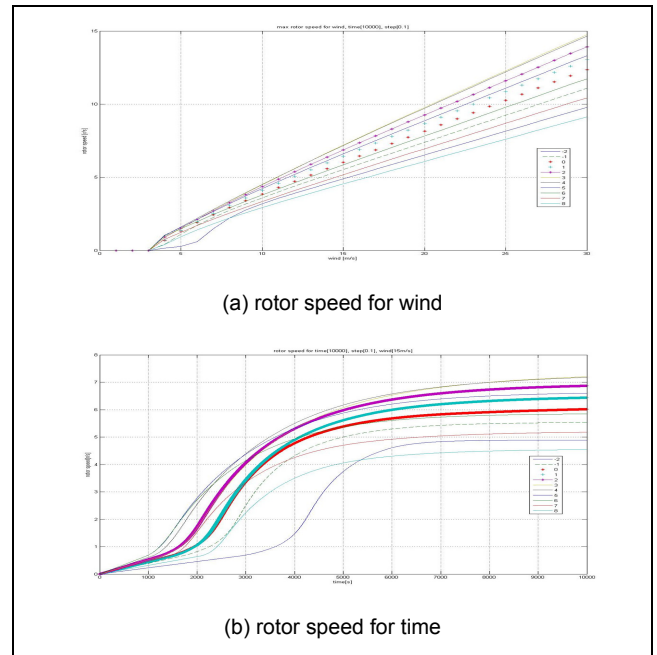


Fig. 3 The result of simulation

후기

본 연구는 에너지관리공단의 풍력핵심기술연구센터 지원 연구비로 수행 되었으며 이에 관련된 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. T.G. van Engelen E.L. van der hooft, P. "Wind turbine control algorithm". Technical report-ECN-C-03-111, December 2003.
2. Jamaloddin Noorzaei, etc 4, "Simulation of wave and current forces on template fooshore structures", Suranaree J. Sci. Technol. Vol. 12 No. 3; Jul-Sept, 2005.
3. Kausihan Selvam, "ECN Educational Wind Turbine Control Toolbox", ECN-E-06-051December 2006.
4. "기계와 재료" 한국기계연구원 제 19 권 제 2 호 2007 여름, 특집:대형 풍력터빈 기술