

풍력 터빈 적용 제어기의 모사실험을 위한 4-자유도 풍력 발전기 모형 유도

Derivation of 4-DOF Wind Turbine Model for Simulation of Control Algorithm Applied to Wind Turbine

신윤희† · 문석준* · 남용윤* · 김창현* · 류지윤**

Y. H. Shin, S. J. Moon, Y. Y. Nam, C. H. Kim and J. Y. Ryu

1. 서 론

풍력에너지에 대한 관심이 고조되고 있는 상황에서 보다 정밀한 풍력 터빈의 모사실험 기술이 요구되고 있다. 본 연구에서는 풍력 터빈 제어기 검토를 위한 4-자유도 풍력 터빈 모형 유도 절차를 기술하고자 한다.

2. 풍력 터빈 모형

2.1 4-자유도 풍력 터빈의 수학적 모형

본 연구에서 관심을 가지는 풍력 터빈은 3MW급으로서 터빈 날개의 공력 특성은 그림 1과 같으며, 터빈 모형화를 위해 사용된 가정은 다음과 같다.

- 공력회전 토크 및 발전기 토크에 의해 가동되는 2자유도 비선형 모형
- 추력에 의해 전후로 거동하는 등가 병진 방향 2자유도 비선형 모형 (타워의 1차 굽힘 모드, 날개의 1차 굽힘 모드)
- 발전기 시스템의 동적 거동 무시
- 시스템 내 신호처리 필터 등의 동적 특성 무시

언급한 내용을 바탕으로 유도한 4-자유도 풍력 터빈에 대한 운동방정식은 식(1)과 같으며, 이에 대한 터빈의 근사화를 그림 2에 도시한다.

$$\begin{aligned}
 J_r \frac{d\Omega_r}{dt} &= T_a(\lambda, \beta) - k_s(N\theta_r - \theta_g) - k_s(N\Omega_r - \Omega_g) - B_r\Omega_r \\
 J_g \frac{d\Omega_g}{dt} &= k_s(\theta_r - \frac{1}{N}\theta_g) + c_s(\Omega_r - \frac{1}{N}\Omega_g) - B_g\Omega_g - T_g \quad (1) \\
 (M_r + nm_b)\ddot{y}_r + nm_{b1}\ddot{y}_b + B_r\dot{y}_r + K_r y_r &= F_r \\
 nm_{b1}\ddot{y}_r + nm_{b2}\ddot{y}_b + nB_b\dot{y}_b + nK_b y_b &= F_b
 \end{aligned}$$

여기서 입력에 해당하는 공력토크와 추력은 다음의 식을 이용하며, 이는 계의 비선형성을 야기하는 항이다.

$$\begin{aligned}
 T_a &= \frac{\rho\pi R^3}{2} C_Q(\lambda, \beta) V_e^2, \\
 F_a &= \frac{\rho\pi R^2}{2} C_T(\lambda, \beta) V_e^2, \quad \lambda = \frac{R\Omega_r}{V_e} \quad (2)
 \end{aligned}$$

추력 및 공력 토크를 산출하기 위한 바람 속도는 타워와 날개의 거동특성을 반영한 상대적인 바람을 산출해야 하며 이는 식(3)을 이용하여 계산한다.

$$V_e = V - \dot{y}_r - \dot{y}_b \quad (3)$$

모사실험을 위해 사용되는 난류를 포함하는 바람 입력의 생성은 IEC-61400-1을 참조하여 생성하였으며, 본 연구에서 모사실험을 위해 관심을 가지는 구간은 전격 속도 이하의 구간으로 효율이 최대가 되도록 운전하는 구간에 해당한다.

2.2 토크 루프 제어기의 적용

토크루프 제어기는 풍력 터빈에서 최대 출력 제어를 위해 일반적으로 널리 사용되고 있는 제어기로서 발전기 토크를 식(4)와 같은 방법으로 발전기 로의 명령 토크를 산출한다. 기본적인 구조는 발전기의 속도를 되먹임하여 발전기의 토크를 제어하는 제어기로서, 주속비에 따른 출력계수의 변화 곡선과 발전기 토크 사이의 수렴성을 이용하여 발전기 출력이 최대가 되도록 하는 토크를 생성하는 제어기이다.

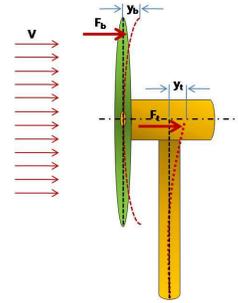
$$T_g = K \times \Omega^2, \quad K = \frac{1}{2} \frac{C_p(\lambda_{opt})}{\lambda_{opt}^3} \rho \pi R^5 \quad (4)$$

† 교신저자: 정희원, 한국기계연구원
E-mail: shinyh77@kimm.re.kr
Tel: 042-868-7211, Fax: 042-868-7418

* 정희원, 한국기계연구원
** 정희원, (주)유니슨 풍력연구소

3. 풍력 터빈 모사실험 결과 고찰

3MW급 풍력 터빈에 대한 4-자유도 근사화 모형을 이용한 모사실험 결과는 그림 3과 같다. 비교를 위해 추력의 영향을 배제한 2자유도 터빈 모형의 모사실험 결과를 함께 나타내었는데, 추력 관련 항들에 의한 저역 주파수 구간 통과 필터링 효과가 적용되어 전체적인 거동 특성이 둔감해지는 효과를 얻게 된다. 이는 유효 바람(V_e)을 계산하여 적용하는 과정의 도입으로 인해 블레이드가 받는 바람이 실제 바람 보다 더 저주파수 구간에 존재함을 의미한다.



(b) Tower and Blade 1st Bending Motion

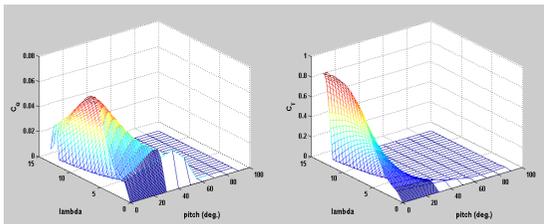
Figure 2 Schematic Diagram of Simplified Wind Turbine

4. 결론

본 연구에서는 풍력 항에 의한 비선형성을 고려한 4-자유도 풍력 터빈 모형을 유도하였으며, 모사실험을 통해 그 성능을 검토하였다.

후 기

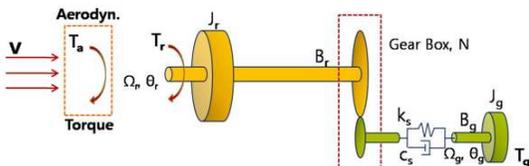
본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제 결과의 일부입니다. ('풍력발전시스템용 제어 기술 및 기기개발', No. 20103010020040)



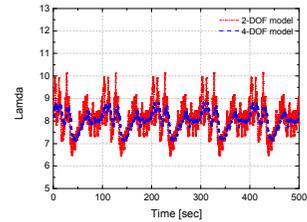
(a) C_Q Curve

(b) C_T Curve

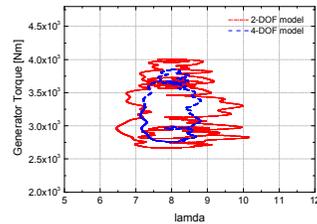
Figure 1 Aero-dynamic Characteristic Coefficients of Wind Turbine



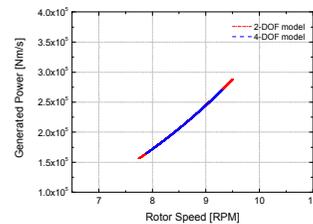
(a) Drive-Train Motion



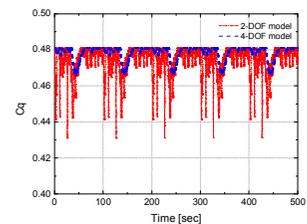
(a) Time vs. Tip Speed Ratio



(b) Tip Speed Ratio vs. Generator Torque



(c) Rotor Speed vs. Generated Power



(d) Time vs. Power Coefficient

Figure 3 Simulation Results of Torque Loop Control