

MW급 풍력발전기 특성 해석

Characteristic analysis of MW wind turbine

*# 박종식¹, 김경기¹, 남윤수²

*#J. S. Park(pjsqwerty@nate.com)¹, J. G. Kim¹, Y. S. Nam²

¹ 강원대학교 대학원 메카트로닉스 공학과, ² 강원대학교 기계·메카트로닉스 공학부

Key words : Wind turbine, Steady state, Operating point

1. 서론

화석연료를 이용한 화력 발전소가 배출하는 온실가스 및 원자력 발전소의 방사능 누출 위험성 등의 처리문제가 사회적 이슈로 떠오르면서 신재생 에너지 연구개발이 세계적으로 대두되고 있다. 그 중 풍력발전은 타 친환경에너지에 비해 상대적으로 우수한 경제성으로 연간 20%이상의 성장을 보이고 있는 산업분야 중 하나이다. 풍력발전기는 경제성을 이유로 설계수명이 20년 이상 확보되어야 한다. 고가[高價]의 거대 구조물인 풍력발전기를 설계하고 설치하기 위해서는 풍력발전기 설계 시 그 특성을 정확하게 이해하고 파악해야하며, 또한 추후 피치 제어기를 설계하기 위해서도 반드시 선행되어야 하는 중요한 부분이다. 본 연구에서는 MW 풍력 발전기의 제어 전략, 정상 상태(steady state) 해석 및 특성 해석에 관하여 논의하였다.

2. 풍력발전기의 제어 전략

풍력 발전기는 바람의 운동 에너지를 전기 에너지로 변환시키는 장치이다. 식(1)은 바람이 갖는 파워를 나타내며, 바람 속도(v)의 세제곱에 비례한다[1]. C_p 는 파워 계수(power coefficient)라하며 이는 풍력 발전기가 바람에너지로부터 추출 가능한 파워 회수율을 의미한다. 특히, 이 값은 1920년대 Albert Betz에 의해 이론적으로 풍력 발전기가 바람 에너지로부터 얻을 수 있는 최대 회수율은 0.593이라 정의되었다.

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p v^3 \quad (1)$$

여기서, ρ 는 공기밀도, R 은 로터(rotor)반지름 그리고 v 는 풍속을 나타낸다. Fig. 1은 MW급 풍력 발전기의 C_p 를 나타낸 것이다. Fig. 1의 특성을 갖는 풍력 발전기의 경우, λ 와 β 각이 일정한 값으로 고정 될 경우 최대 효율을 갖는다. Fig. 2는 풍력 발전기의 파워커브(power curve)이다. 정격 풍속(v_{rated})을 기준으로 두 개의 작동 모드로 구분할 수 있다. Fig. 2의 Region I는 'below rated 영역'이라 하며, 풍력 발전기의 C_p 가 최대

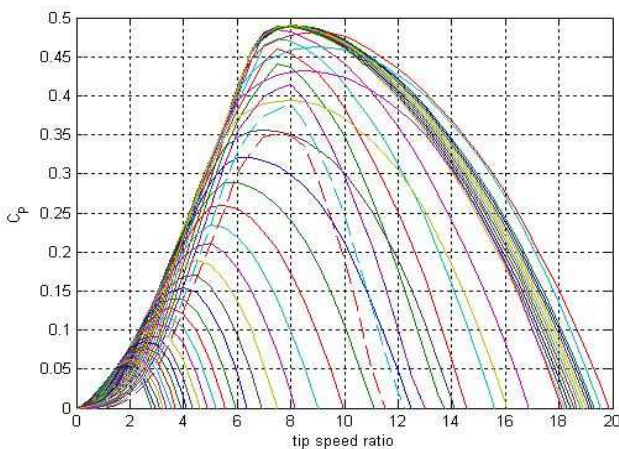


Fig. 1 Power coefficient by wind turbine

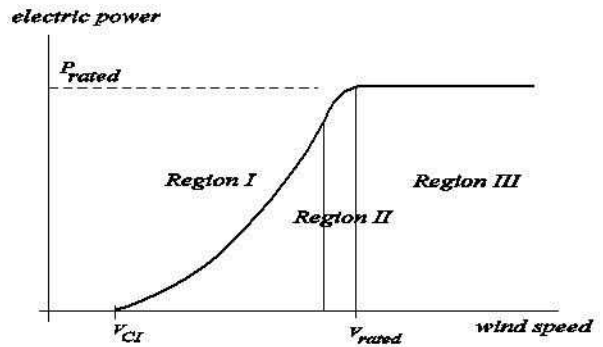


Fig. 2 Power curve by wind turbine

상태를 유지하도록, 즉 Fig. 1 특성의 풍력 발전기는 일정한 λ 와 β 의 조건으로 작동되어야 한다. 이 영역에서 풍속이 변하면 회전날개의 속도도 함께 변화시켜야 한다. Fig. 2에서 Region III는 'above rated 영역'이라 하며, 풍력 발전기의 출력을 정격 파워(rated power, P_{rated})로 유지 시킨다. 이 구간에서는 피치 각을 조정하여, C_p 값을 낮추는 피치 제어 방식을 사용한다. 또 다른 방식은 회전 날개의 공기역학적 실속(stall) 현상을 이용하는 실속 제어 방식인데, 이는 풍력 발전기 구조물에 큰 기계적 하중을 유발하기 때문에 MW 규모의 대형 풍력 발전기에는 적합하지 않은 방식이다[2].

3. 정상상태 해석

Fig. 3은 피치 각이 일정 할 때 공기역학 토크(aerodynamic torque)를 로터 회전속도에 대하여 나타낸 것이다. 풍력 발전기는 로터에서 발생하는 공기역학 토크와 반대 방향인 발전기 반력 토크(reactive torque)를 발생시킨다. 공기역학 토크는 블레이드의 형상과 풍속 등 여러 요인에 의하여 결정되는데, 이 때 공기역학 토크와 발전기 반력 토크가 평형을 이루는 상태를 정상 상태라 정의한다. 또한, Fig. 3에서 A-B-C-D-E-F점을 작동점(operating point)이라 하며, A~F점 까지 그려진 곡선은 발전기 토크 설정 로직이다. Fig. 2에서 Region I는 C_p 가 최대가 되도록 유지한다고 하였는데, 각 풍속에 해당하는 작동점 A-B-C-D-E를 따라 공기역학 토크와 발전기의 반력 토크는 정상 상태를 유지하며 작동하게 된다. D-F사이 구간에서는 Region I와 Region III 구간을 부드럽게 이어주는 천이구간이며, 발전기가 정격 풍속에 도달하면 피치 각을 조절하여 C_p 의 효율을 낮추어 발전기의 토크가 식(2)과 같이 F점에서 머물며 정격 파워(rated power)를 출력하게 된다[3].

$$T_e^c = \frac{P_{rated}}{\Omega_r} \quad (2)$$

한편, 공기역학 토크는 식(3)과 같이 주어진다. 이 식에서 공기역학 토크(T_a)는 날개 회전속도(Ω_r), 풍속(v) 그리고 피치 각(β)의 비선형 함수로 되어있음을 알 수 있다. 따라서 선형 해석 및 제어기 설계를 위하여, 이 식을 Taylor 시리즈를 이용하여 식(4)와 같이 선형화 할 필요가 있다.

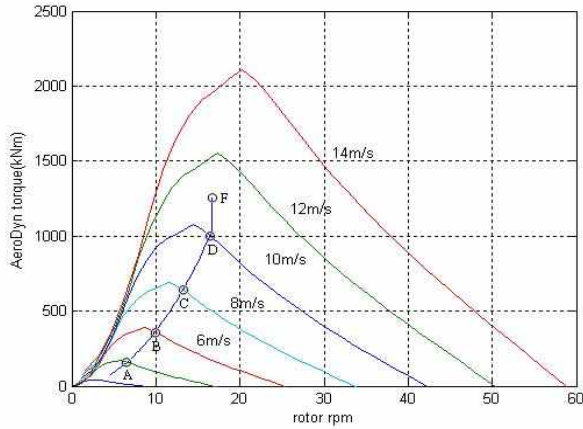


Fig. 3 Aerodynamic torque by WT operation condition

$$T_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 C_Q(\lambda, \beta) v^2 = T_a(\Omega_r, v, \beta) \quad (3)$$

여기서, C_Q 는 토크 계수(Torque coefficient)이다.

$$\Delta T_f \cong \left(\frac{\partial T_f}{\partial \Omega} \right)_o (\Omega - \Omega_o) + \left(\frac{\partial T_f}{\partial v} \right)_o (v - v_o) + \left(\frac{\partial T_f}{\partial \beta} \right)_o (\beta - \beta_o) \quad (4)$$

풍속에 변화가 없다면, 풍력 발전기는 하나의 작동점에서 머물고 있을 것이다. 만일, 풍속이 순간적으로 변하게 되면 회전 토크도 함께 변화할 것이며, 일시적으로 증가된 회전 토크는 발전기의 반력 토크에 의해 다시 작동점 근처로 이동하게 된다. 그리고 최대 출력을 낼 수 있도록 $Max C_p$ 선을 따라 작동할 것이다. Fig. 4는 풍속에 대해 C_p 와 λ 의 변화를 나타낸 것이다. 정격 풍속 이하에서는 C_p 와 λ 가 최대 효율을 갖기 위해 일정한 값을 유지시키며, 그 이후 구간에서는 피치 각을 조절하여 C_p 의 효율을 줄이면서 정격과위를 출력하게 되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5는 풍속에 대해 피치 각, 발전기 토크 그리고 로터 스피드가 어떠한 작동점을 가지고 운전되어야 하는지 나타낸 시뮬레이션 결과이다. Fig. 6 또한 풍력발전 시스템을 풍속, 로터 스피드 그리고 피치 각으로 운전 조건의 변화를 3차원으로 나타낸 것이다. 정격 풍속 이하에서는 로터 스피드만을 이용하여 작동되는 것을 알 수 있으며, 반면 정격 풍속 이상(Region III)에서는 로터 스피드는 고정되고 피치 각만이 작동하는 것을

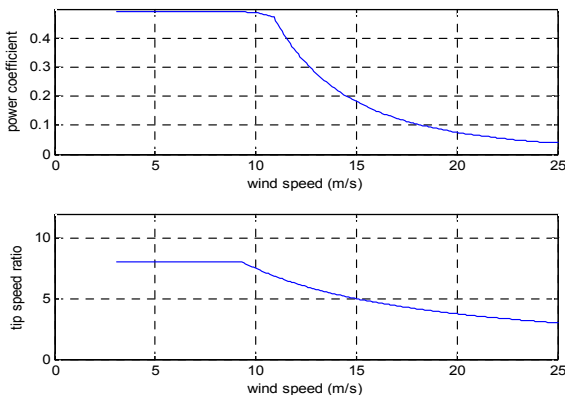


Fig. 4 C_p, λ variation by WT operation condition

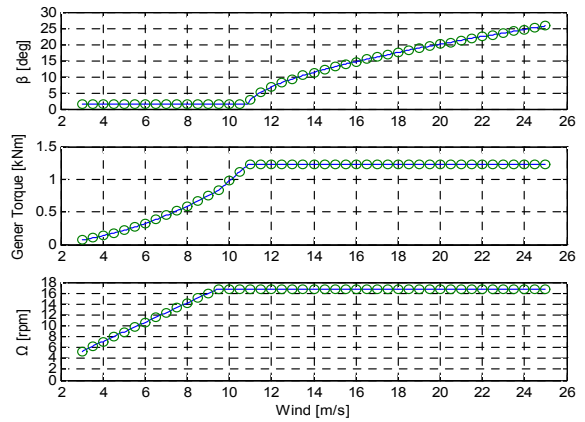


Fig. 5 Operating point by wind turbine

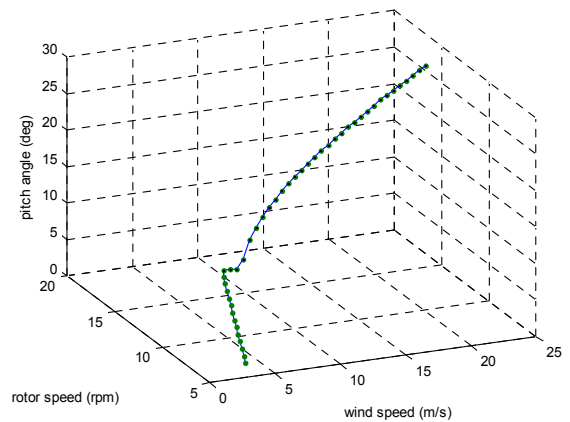


Fig. 6 Pitch angle variation by WT operation condition

확인 할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 가변속 피치제어 풍력 발전기의 제어 전략과 그 제어 전략에 맞는 정상 상태 해석을 하였다. 또한, 비선형적인 특성을 갖는 풍력 발전기가 시동 풍속에서 중단 풍속까지 변화함에 따라 발전기, 로터 스피드 그리고 피치 각이 각각의 작동점에서 어떻게 작동되어야 하는지 논의하였다.

후기

본 논문은 지식경제부의 지원으로 수행한 연구결과입니다.

참고문헌

1. E. Hau, "Wind turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics," Springer, 2nd Edition, 2005.
2. F. D. Bianchi, H. D. Battista, "Wind Turbine Control Systems Principles, Modeling and Gain Scheduling.", Springer, 2007.
3. 남윤수, "풍력 터빈의 제어", 2009.