

MW급 풍력터빈의 출력 제어[§]

남윤수*, 김정기**†, 최한순*, 조장환*

* 강원대학교 공과대학 기계메카트로닉스공학과

Power Control of MW Wind Turbine

Yoonsu Nam*, Jeong Gi Kim**†, Han Soon Choi* and Jang Hwan Cho*

* Dept. of Mechanical and Mechatronics Engineering, College of Engineering, Kangwon Nat'l Univ.

(Received July 5, 2010 ; Revised November 9, 2010 ; Accepted November 10, 2010)

Key Words: Wind Turbine(풍력터빈), Torque Command Generation(토크명령 생성), Pitch Control(피치 제어), Power Curve(파워커브)

초록: 본 논문은 풍력터빈의 출력 제어 방법에 관한 논문이다. MW급 풍력 터빈 출력제어의 기본 제어 구조는 가변속도 가변피치 방식을 사용한다. 가변속도 가변피치 제어는 파워 커브를 추종하기 위한 방법으로서, 풍속변화에 따라 이 제어방식이 어떻게 적용되는지 논의한다. 제어 시스템 설계를 위하여 단순화된 드라이브 트레인 모델이 사용되었다. 제어 시스템은 토크제어와 피치제어로 구성되고, 제시된 동적 모델을 사용하여 설계된 제어 시스템의 시뮬레이션 결과에 대하여 논의한다.

Abstract: In this paper, a methodology for the power control of a wind turbine, which is the variable-speed and variable-pitch (VSVP) control system, is introduced. This control methodology maximizes the capability of the turbine to extract maximum power from the wind in the regions with low wind speeds. Further, it regulates the wind-turbine power as the rated power in the case of the regions with high wind speeds. A simple drive train model is used to design the VSVP control system. The methodology for VSVP control is mechanized by controlling the generator torque and blade pitch. Finally, some simulation results for the VSVP control to a MW wind turbine are discussed in this paper.

- 기호설명 -

ρ : 공기밀도(1.225kg/m³)
 R : 로터 반경
 N : 기어박스의 증속비
 v : 풍속
 Ω_R : 로터 회전 속도
 β : 피치각
 λ : $\frac{R\Omega_R}{v}$, 선단속도비
 C_P : 파워 계수
 T_a : 공력 토크
 T_g : 발전기 토크
 P_E : 발전기 전기적 출력

B_r, B_g : 로터, 발전기의 댐핑 계수

k_S : 저속 회전축의 비틀림 계수

1. 서 론

풍력터빈은 바람이 갖고 있는 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 장치이다. 바람의 운동에너지가 풍력 터빈의 로터(rotor)를 회전시키는 기계적 에너지로 변환되고, 변환된 기계적 에너지는 발전기를 회전시켜 전기 에너지를 출력하게 된다. 이때, 풍력터빈의 입력인 바람의 운동에너지에 대한 전기적 출력을 파워계수(power coefficient)라 불리는 C_P 로 그 효율을 나타낼 수 있다.⁽¹⁾ 만약, 풍력터빈의 C_P 값이 전체 작동영역에서 일정하다면 전기적 출력은 바람의 3승에 비례하여 나타나게 된다. 일정한 C_P 값을 유지하기 위해서는 풍속 변화에 비례하여 로터의 회전속도를 증가시켜야 한다. 그러나, 로터의 회전속도가 계속적으로 증

§ 이 논문은 2010년도 대한기계학회 강원지회 춘계학술대회(2010. 5. 14., 강원대) 발표논문임

† Corresponding Author, jeonggi@kangwon.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

가하게 되면, 풍력터빈의 각 기계요소에 대한 기계적 부하가 증가하고 소음을 발생시킬 수 있다. 또한, 풍속의 분포를 확률적으로 볼 때, 정격풍속 (rated wind speed) 이상의 풍속이 불 확률은 상대적으로 작기 때문에 풍력터빈의 출력을 풍속에 따라 지속적으로 증가시키는 것은 비용적, 효율적인 면에서 바람직하지 못하다. 이러한 여러가지 요인에 의해 풍력터빈의 출력을 정격풍속 이상에서 일정한 출력을 내도록 하는 방법이 널리 사용된다.⁽²⁾

본 논문에서는 MW급 풍력터빈의 출력 제어 방식에 있어서 널리 쓰이는 가변속도 피치제어 (variable speed pitch control) 방식에 관한 논문이다.⁽³⁾ 가변속도 피치제어는 정격풍속 이전에서는 로터의 회전속도를 조절하여 최대 출력을 얻도록 하고, 정격풍속 이상에서는 피치를 사용하여 풍력터빈의 출력을 일정하게 유지하도록 하는 작동 방식이다.

2. 제어 전략

Fig. 1은 MW급 풍력터빈의 일반적인 파워 커브(power curve)로 풍력터빈으로 불어오는 바람에 대하여 풍력터빈의 전기적 출력을 나타낸 그림이다. 전기적 파워 P_E 는 다음 식 (1)에 의해서 결정된다.

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

풍력터빈의 작동영역은 Fig. 1에서 보듯이 크게 3개의 영역으로 나눌 수 있다. 정격풍속보다 낮은 풍속영역에서 풍력터빈의 에너지 회수효율을 최대로 하는 $Max - C_p$ 구간인 I-영역, 정격풍속까지의 천이영역인 II-영역, 그리고 정격풍속 이후에서 피치를 사용하여 C_p 값을 낮춰 일정한 출력을 얻도록 하는 정격출력 유지구간인 III-영역

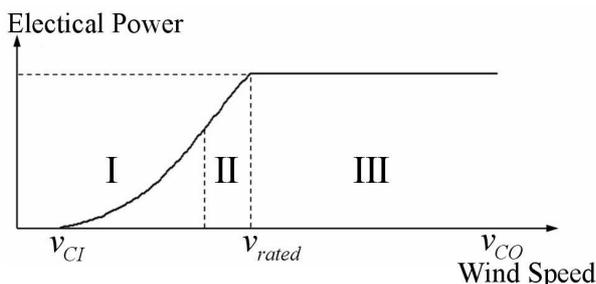


Fig. 1 Power curve

으로 나눌 수 있다. I-영역에서 풍력터빈의 작동은 $Max - C_p$ 조건을 만족하도록 운전되어야 한다. Fig. 2에 그려진 것처럼, C_p 는 선단속도비(tip speed ratio)와 피치각의 함수로 결정되고, 각각 λ 와 β 의 기호로 표기된다. Fig. 2는 풍력터빈의 C_p 값이 선단속도비와 피치각 변화에 따라 어떻게 변화하는 지 나타낸 것으로, 각각의 그래프는 특정 피치각 β^* 부터 피치각이 증가할 때의 C_p 값 변화를 나타낸 것이다. Fig. 2에서 알 수 있듯이, 풍력터빈의 최대 C_p 값은 피치각이 β^* 와 선단속도비가 λ^* 인 조건을 만족할 때이다. 따라서, I-영역에서는 피치각을 β^* 값으로 고정시키고, 일정한 λ^* 값을 유지시키기 위하여 풍속에 비례하여 ($\lambda = (R\Omega_R)/v$) 로터의 회전속도를 조절하여야 한다. 로터의 회전속도를 조절하기 위해서는 바람에 의해 로터에서 발생하는 공력토크(aerodynamic torque)만큼 발전기 반력 토크(generator reactive torque)를 걸어주어 원하는 로터회전속도를 얻을 수 있다.

II-영역부터는 I-영역과는 다르게, 로터의 회전속도가 풍속에 무관하게 항상 일정한 정격속도가 된다. 최대로 바람 에너지를 회수하기 위하여, 로터의 회전속도를 풍속에 비례하여 증가시키지 못하는 이유는 날개의 끝단에 발생하는 소음에 대한 제한 때문이다. 육상 풍력터빈의 경우, 날개 끝단 소음을 일정크기 이하로 유지시키려면, 날개 끝단의 선속도를 대략 75 m/s이하로 제한시켜야 한다.⁽⁴⁾ 한편, 블레이드의 피치각이 β^* 의 값으로 고정되어야 한다는 면에서, Fig. 1의 III-영역과도 구분된다. 이 구간에서 로터의 회전속도가 고정되기 때문에, C_p 값은 I-영역 구간처럼 $Max - C_p$ 조건을 유지하지 못한다.

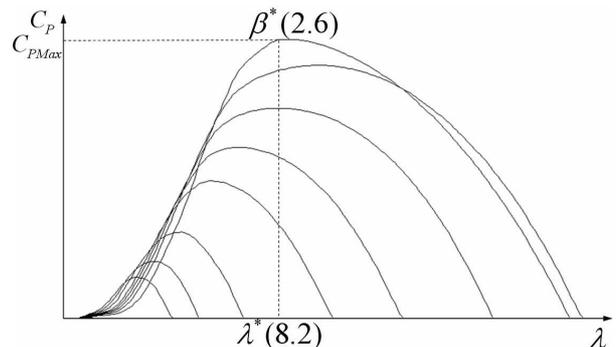


Fig. 2 Power coefficient

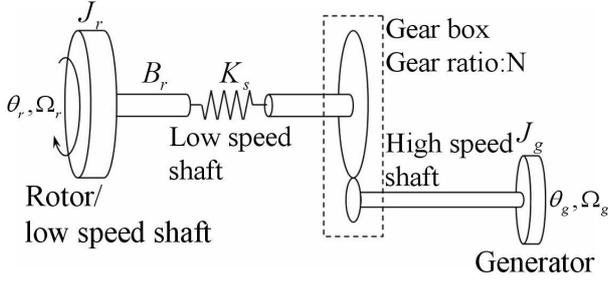


Fig. 3 Simplified drive train model

III-영역은 정격출력 유지구간으로 정격출력을 유지하기 위해 식 (1)에서 알 수 있듯이 풍속의 3승에 반비례하게 C_p 값을 낮춰야 일정한 전기적 출력을 얻을 수 있다. Fig. 2를 보면 피치각이 β^* 의 값보다 커질수록 C_p 값이 점차 낮아지는 것을 알 수 있다. 즉, 정격풍속보다 높은 바람에 대해서는 바람이 갖고 있는 에너지를 전부 회수하지 않고 피치각을 사용해 원하는 만큼의 전기적 출력을 얻도록 조절한다.

3. 동적 운동 모델

이 장에서는 풍력터빈의 제어기 설계를 위한 동적 운동모델을 유도한다. 본 논문에서는 풍력터빈의 공탄성(aero-elastic) 문제는 다루지 않기 때문에 블레이드(blade)나 타워(tower)의 진동에 의한 영향은 고려하지 않는다. Fig. 3은 풍력터빈의 로터에서 발전기까지의 구조를 간략히 나타낸 그림이다. Fig. 3의 모델은 풍력터빈의 성능해석에만 유효한 모델로, J_r 과 J_g 는 풍력터빈 로터와 발전기의 회전관성질량에 해당한다. 각각의 관성질량에 대한 지배방정식은 식 (2)와 같다.⁽⁵⁾

$$\begin{aligned}
 J_r \frac{d\Omega_r}{dt} &= T_a - k_s \left(\theta_r - \frac{1}{N} \theta_g \right) - B_r \Omega_r \\
 J_g \frac{d\Omega_g}{dt} &= \frac{k_s}{N} \left(\theta_r - \frac{1}{N} \theta_g \right) - B_g \Omega_g - T_g \\
 T_a &= \frac{1}{2} \rho \pi R^3 \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} v^2
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

4. 제어 시스템

풍력터빈의 제어구조는 Fig. 4와 같이 피치제어 루프와 토크제어 루프로 구성되어 있다. 피치제어 루프는 정격풍속 이전의 풍속영역에서는 일정한 피치각 β^* 값을 유지할 수 있도록 작동되고,

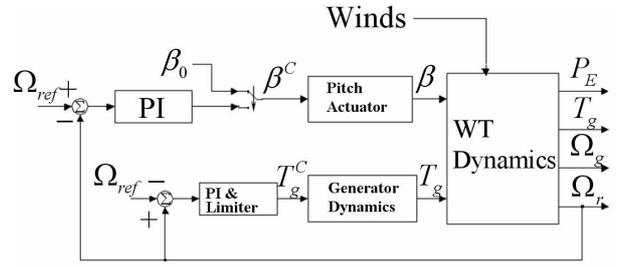


Fig. 4 Control law structure

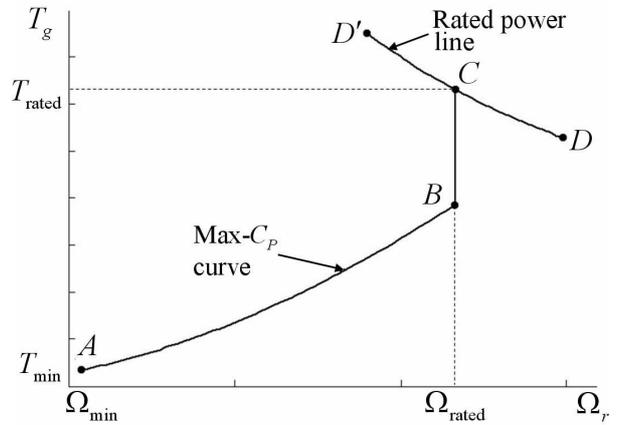


Fig. 5 Torque schedule

정격풍속 이후의 영역에서는 피치루프 PI-제어기를 사용하여 피치각을 조절한다. 토크제어 루프는 토크루프 PI-제어기와 토크 제한기(torque limiter)를 병행 사용하여 발전기 반력토크 명령을 생성해 준다.⁽⁶⁾ 생성되는 토크 명령은 영구자석형 동기발전기(permanent magnet synchronous generator, PMSG)를 사용하는 경우, Fig. 5와 같은 형상을 가지게 된다. 정격회전속도 이전의 로터 회전 영역에서는 토크 제한기에 의해 로터의 회전속도를 $Max - C_p$ 조건에 맞도록 발전기 반력 토크를 생성해주고, 정격회전속도 조건에서는 토크루프 PI-제어기 작동에 의해 정격회전속도를 유지하도록 토크 명령을 생성해 준다.

피치제어루프는 정격풍속 이상의 영역에서 작동된다. 로터의 회전속도를 정격속도로 유지시킬 수 있도록, 피치루프 PI-제어기를 활용하여 적절히 피치각을 증가, 또는 감소시킨다. 피치각을 사용하여 풍력터빈의 C_p 값을 조절하게 되고, 이것으로 로터에 발생하는 공력토크의 양을 조절하게 됨으로써 로터의 회전속도를 일정하게 하고 전기적 출력을 정격출력 부근으로 작동시킨다.

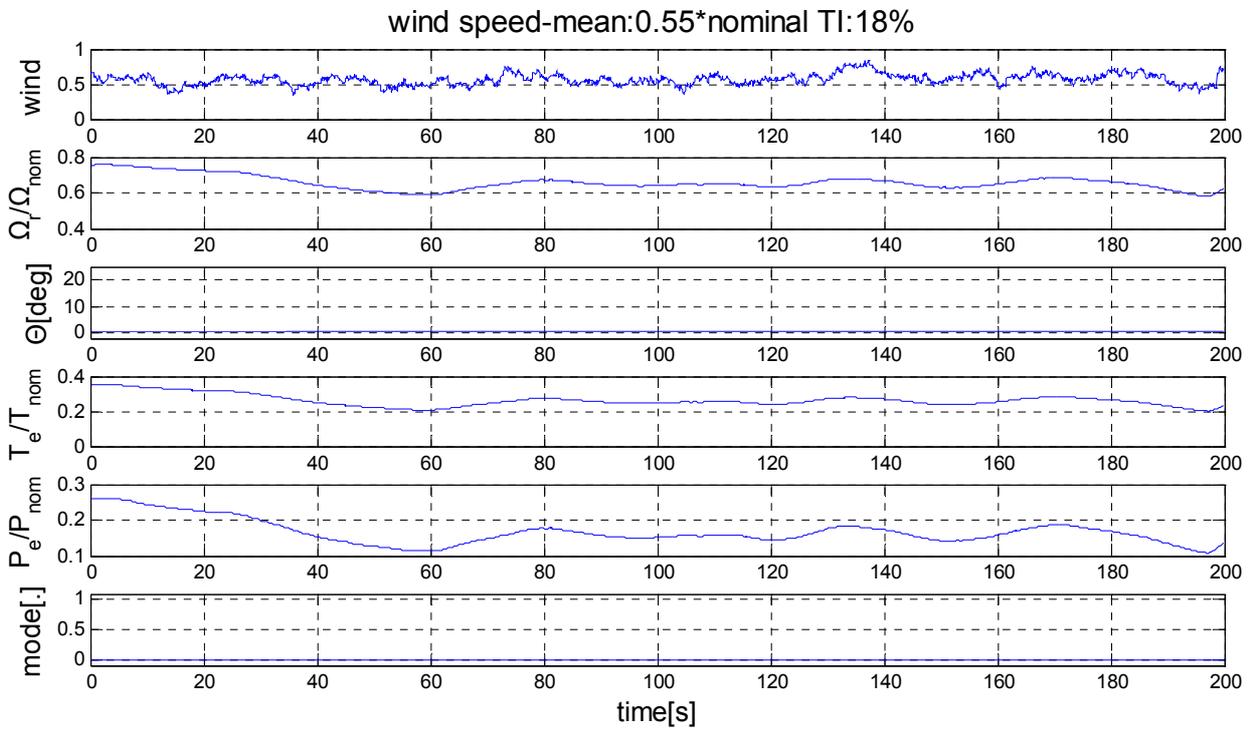


Fig. 6 Simulation results in below rated region

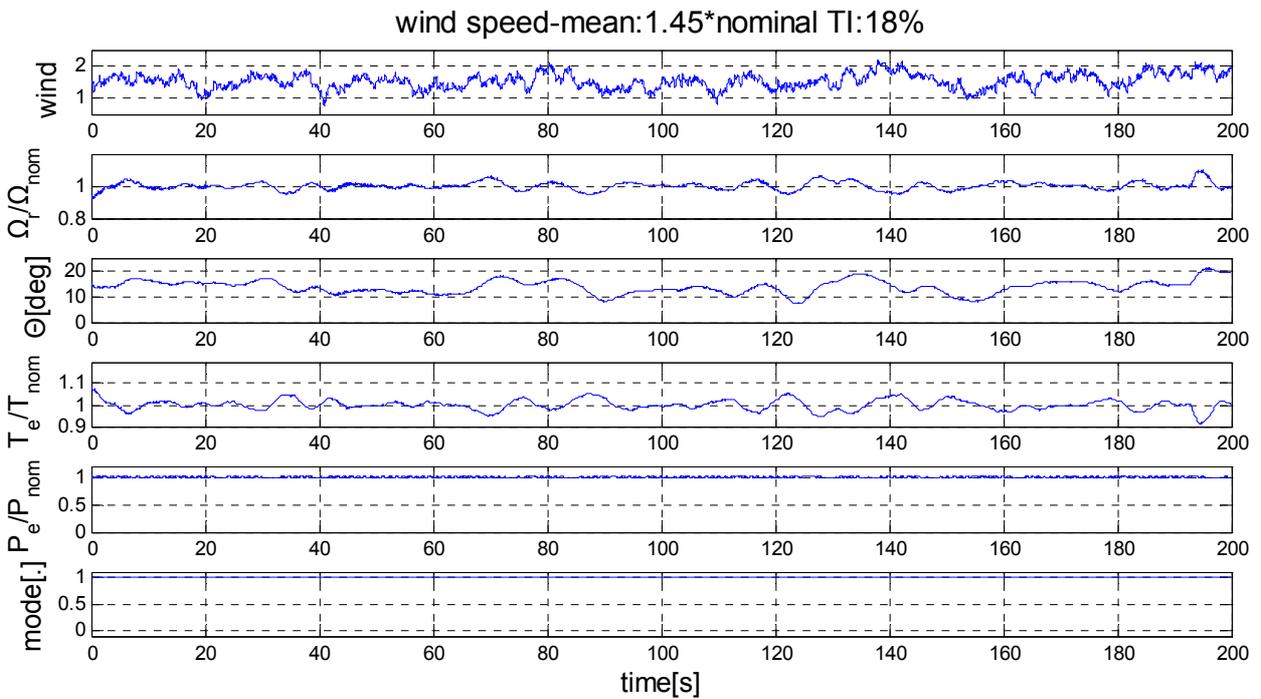


Fig. 7 Simulation results in above rated region

5. 시뮬레이션

Fig. 6 과 Fig. 7 은 정격풍속 이전의 영역과 이후의 영역에 대하여 시뮬레이션한 결과이다. 실제 바람의 경우 일정한 풍속으로 불어오지 않고 시간에 따라 변하게 되는 난류 성분을 포함하게 된다. 따라서 시뮬레이션에 있어서 18% 난류강도를 포함한 바람에 대하여 시뮬레이션 하였다.

정격풍속 이전의 영역에서는 발전기 토크가 로터의 회전속도와 유사한 모습을 보이는데, 이것은 발전기 토크명령 자체를 $Max - C_p$ 커브를 따라가도록 설정되었기 때문이다. 피치각은 일정한 값으로 고정되어 있고 풍속에 따라 로터의 회전속도가 발전기 토크에 의해 적절히 조절되는 것을 알 수 있다.

정격풍속 이후의 영역에 있어서 정격풍속보다 높은 풍속이 풍력터빈으로 불어오더라도 피치제어에 의해 정격출력을 유지하는 것을 볼 수 있다. 각각의 그림에서 모드는 풍력터빈의 피치루프 작동 모드를 나타내는 신호이다. 그 값이 0인 경우는 피치각이 일정한 값으로 고정되는 운전상태이며, 1인 경우는 가변 피치에 의하여 풍력터빈의 출력이 정격으로 유지되는 작동상태를 나타낸다. 본 논문에서 다룬 풍력터빈 제어시스템의 경우 2개의 PI-제어기가 동시에 사용되기 때문에, 제어기 간의 간섭이 발생한다. 따라서, 위와 같은 작동모드를 정의함으로써, 각각의 PI-제어기 작동을 독립적으로 ON/OFF 시킬 수 있기 때문에, VSVP 제어 시스템의 안전한 작동을 구현할 수 있다.

6. 결론

풍력터빈은 일종의 에너지 변환장치로 자연적으로 불어오는 바람에 대해 전기적 에너지를 생산한다. 에너지 변환과정에 있어서 기계장치에

의한 제한들로 인해 출력과위를 적절히 제어해야 한다. 이러한 출력제어는 풍력터빈의 수명을 증가시킬 뿐만 아니라 전력품질에도 많은 영향을 미친다.

본 논문에서는 MW급 풍력터빈의 출력제어에 있어서 가변속도 피치제어를 사용하는 시스템의 제어전략을 소개하고, 제어시스템의 구성 및 원리에 대해 설명하였다. 또한, 수치 시뮬레이션 결과를 바탕으로, 정격풍속 이전과 이후의 영역에 대하여, 제안된 알고리즘대로 풍력터빈의 출력제어가 적절히 수행되는 것을 확인하였다.

후 기

본 결과물은 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다.

참고문헌

- (1) Hau, E., 2005, Windturbines: Fundamentals, Technologies, Application and Economics, Springer, 2nd Edition, pp. 76~79.
- (2) van der Hooft, E.L., Shaak, P. and van Engelen, T.G., 2003, "Wind Turbine Control Algorithms," ECN-C-03-111, ECN. p. 23
- (3) Bianchi, F. D., De Battista, H. and Mantz, R. J., 2007, Wind Turbine Control Systems, Springer. pp. 115~125
- (4) Leloudas, G., Zhu, W., Sorensen, J., Shen, W., and Hjort, S., 2007, "Prediction and Reduction of Noise for a 2.3MW Wind Turbine," *Journal of Physics: Conference series*, Vol. 75, pp. 1~9
- (5) Nam, Y., 2009, Wind Turbine Control, GS-intervision. pp. 113~115
- (6) Bossanyi, E. A., 2008, GH Bladed Theory Manual, GH Bladed p. 42.