

# MW급 풍력 발전기 제어기 설계

## Controller Design of a MW-Class Wind Turbine

\*#김정기<sup>1</sup>, 박종식<sup>1</sup>, 남윤수<sup>2</sup>

\*#J. G. Kim(jeonggi@kangwon.ac.kr)<sup>1</sup>, J. S. Park<sup>1</sup>, Y. S. Nam<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 강원대학교 대학원 메카트로닉스 공학과, <sup>2</sup> 강원대학교 기계메카트로닉스 공학부

Key words : Wind turbine, Pitch control, Torque control, Linearization

### 1. 서론

풍력 터빈(wind turbine, WT)은 바람이 갖고 있는 에너지를 전기 에너지로 변화하는 일종의 에너지 변환 장치이다. 바람의 운동 에너지가 전기 에너지로 변환되는 과정에서 발생하는 손실을 줄이고 최대한 많은 에너지를 얻는 것이 경제적으로 유리하다. 풍력 터빈의 에너지 회수 효율을 결정하는 많은 인자들이 있다. 풍력 터빈의 로터(rotor) 블레이드(blade)의 형상이나 발전기 효율, 기계적인 마찰과 댐핑(damping)등으로 인한 손실이 발생한다. 이와 함께 자연적으로 부는 바람에 대하여 원하는 전기적 출력(electric power)을 얻도록 풍력 터빈의 작동 상태를 결정하는 것 또한 풍력 터빈의 효율에 있어서 매우 중요한 요소이다.

풍력 터빈의 에너지 회수 효율의 지표로서 파워 계수(power coefficient,  $C_p$ )가 사용되는데  $C_p$  값은 풍력 발전기의 선단속도비( $\lambda$ )와 피치각( $\beta$ )의 함수로 나타내어 진다. 여기서 선단속도비는 블레이드 끝단의 선속도를 풍속( $v$ )으로 나눈 값이므로 결국 특정 풍속  $v$ 에서 로터 회전 속도( $\Omega_R$ )와 피치각을 결정하게 되면 원하는 만큼의 전기적 출력을 얻을 수 있다.

따라서 본 논문에서는 MW급 풍력 터빈의 제어 방식으로 널리 쓰이는 가변속도 피치제어(variable speed pitch regulated) 작동 방식의 모델을 바탕으로 풍력 터빈의 작동 상태를 정의하고, 작동 상태에서의 제어 전략과 함께 가변속도에 따른 토크 제어(torque control)와 정격 출력을 유지시키기 위한 피치 제어(pitch control)를 위한 제어 시스템 설계에 관해 논의한다.

### 2. 풍력 터빈의 제어 전략

Fig.1은 가변속도 피치제어 방식을 사용하는 풍력 터빈의 파워 커브(power curve)로 발전을 개시하는 시동풍속(cut-in wind speed,  $v_{CI}$ )에서 발전을 중지하는 종단풍속(cut-out wind speed,  $v_{CO}$ )까지의 전기적 출력을 나타내는 그림이다. 그림의 I 영역은 풍력 터빈의 효율, 즉  $C_p$  값을 최대로 하는 Max  $C_p$  구간이고 III 영역은 풍력터빈의 출력을 일정하게 유지하는 정격출력(rated power) 유지 구간이다. II 영역은 I 영역에서 III 영역으로 넘어가는 과도적인 구간이다. 풍력 터빈의 출력은 식 (1)에 의해 결정된다.

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

여기서,  $\lambda = \frac{R\Omega_R}{v}$ ,  $\rho$ : 공기밀도,  $R$ : 로터반경

I 영역은 Max  $C_p$  구간으로  $C_p$  값이 최대인 특정  $C_p^*$  값을 가지게 되므로 풍속의 3제곱에 비례하는 전기적 출력이 얻어진다.  $C_p(\lambda, \beta)$ 는 선단속도비와 피치각의 함수이므로 특정  $C_p^*$  값을 유지하기 위해서는 선단속도비와 피치각을 특정  $\lambda^*, \beta^*$  값으로 유지시켜야 한다. 따라서 I 영역에서는 피치각은  $\beta^*$  으로

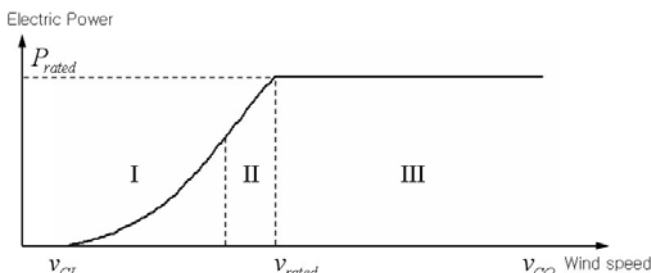


Fig. 1 Wind turbine power curve

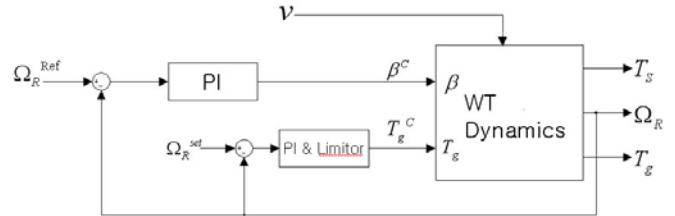


Fig. 2 Control law structure of a wind turbine

고정시키고  $\lambda^*$  를 일정하게 하기 위해 풍속에 비례하게 로터의 회전속도를 제어해야 한다. II 영역은 풍력 터빈의 기계적인 하중이나 로터에서 발생하는 소음의 영향으로 인해 로터의 회전속도가 정격 풍속 이전에 정격 회전 속도에 도달하게 되므로 로터의 회전 속도가 증가하지 않고 정격 속도로 유지하여야 한다. III 영역은 풍력 터빈의 출력을 일정하게 유지하기 위해  $C_p$  값을 풍속의 3제곱에 반비례 관계로 낮춰줘야 한다. 이 때, 피치각을 점차 증가시켜 효율을 떨어뜨려 정격 출력을 유지하도록 제어가 이루어져야 한다.

Fig.2는 풍력 터빈의 일반적인 제어 구조를 나타낸 것으로 아래의 토크제어 루프를 통해 로터 회전 속도를  $C_p^*$  값을 유지하도록 제어하고 정격 풍속 이상에서 정격 출력을 유지하기 위해 위의 피치제어 루프를 사용한다.

### 3. 풍력 터빈의 동적 특성

이 절에서는 제어기를 설계하기 전에 제어할 대상인 풍력 터빈의 동적 운동 특성을 파악하기 위하여 단순화된 풍력 터빈 모델을 이용하여 운동 방정식을 유도하고 비선형 특성을 같은 동적 모델의 선형화 해석을 통해 동적 특성을 파악한다.

Fig.3은 풍력 터빈의 로터에서 발전기까지의 구조를 간략화하여 나타낸 것으로 풍력 터빈의 성능 해석에만 적합한 모델이다. 그림에 나타난 모델로부터 로터부분의 관성질량과 발전기 부분의 관성질량에 대한 운동 방정식은 다음과 같이 나타낸다.

$$J_r \frac{d\Omega_r}{dt} = T_a - k_s \left( \theta_r - \frac{1}{N} \theta_g \right) - B_r \Omega_r \quad (2)$$

$$J_g \frac{d\Omega_g}{dt} = \frac{k_s}{N} \left( \theta_r - \frac{1}{N} \theta_g \right) - B_g \Omega_g - T_g$$

$$T_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} v^2 \quad \text{로터에 발생하는 공력토크 (aerodynamic torque)}$$

$J_r$ : 로터와 저속 회전축의 관성질량

$k_s$ : 저속 회전축의 비틀림 계수

$N$ : 기어 박스의 증속비

$J_g$ : 발전기의 관성질량

$B_r, B_g$ : 저속, 고속 회전축 댐핑계수

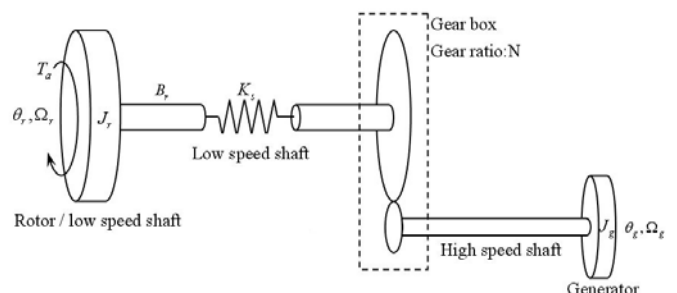


Fig. 3 Dynamic performance model of a wind turbine

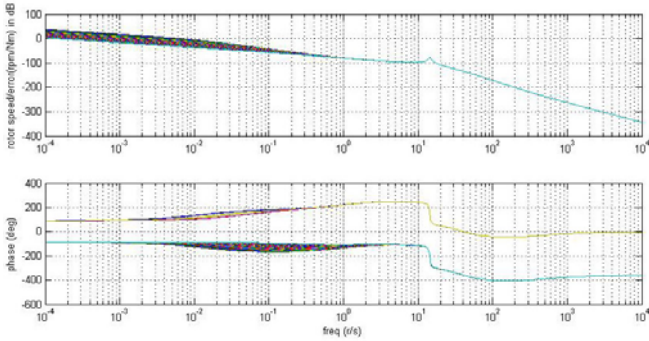


Fig. 4 Frequency response of a torque control loop

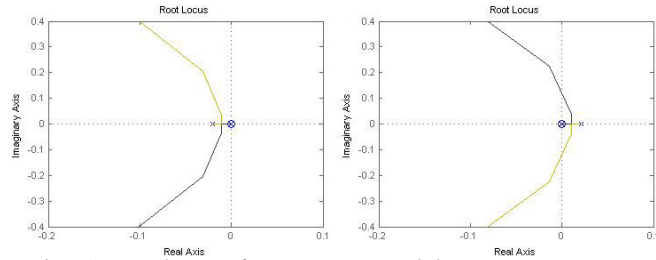


Fig. 5 Root locus of a torque control loop

위 식에 나타난 공력토크는 그 특성이 매우 비선형적이므로 일반적으로 사용되는 선형제어기를 사용하기 위해 선형화 해석을 거쳐야 한다. Fig.2에 나타난 풍력터빈의 동적 특성을 식 (2)를 사용하고 각각의 풍속에 대해 선형화 과정을 수행한다.

Fig.4는 토크 제어 루프의 토크 입력에 대한 로터 회전속도의 주파수 응답을 나타낸 것으로 크로스 오버 주파수가 아주 낮은 주파수 영역에 있는 것으로 미루어 그 응답속도가 느린 시스템인 것을 예측할 수 있다. 따라서 시스템의 응답속도를 개선하기 위해 적절한 비례제어 게인 값을 설정하여야 한다. 하지만 비례제어 게인 값을 너무 크게 설정해 버리면 시스템 자체가 불안정해 지므로 주의해야 한다. 주파수 응답의 위상 선도는 두 개의 그룹으로 나뉘어 있는데 위쪽 영역의 그룹은 시스템 자체가 불안정한 위상을 갖는다. Fig.5는 토크제어 루프의 근극제 해석을 수행한 것으로 왼쪽 그림은 주파수 응답의 위상선도의 아래 그룹의 한 지점이고 오른쪽 그림은 위쪽 그룹의 한 지점이다. 페루프 시스템의 응답을 결정하는 우세극(dominant pole)의 위치가 s-평면에서 위쪽 그룹은 왼쪽에, 아래 그룹은 오른쪽에 나타나지만 PI 제어기의 작용으로 인해 두 그룹의 페루프 시스템은 안정한 영역에서 작동하게 된다.

Fig.6은 정격 풍속 이상에서 토크제어 루프를 포함한 피치제어 루프의 주파수 응답을 나타낸 것으로 크기선도에서 알 수 있듯이 정격 풍속 근처에서 응답이 느리고 높은 풍속으로 갈수록 그 응답의 빠르기가 커지는 것을 예측할 수 있다. 따라서 고정된 제어기 게인(gain) 값으로 제어하기가 힘들기 때문에 변화하는 풍속에 따라 일정한 응답속도를 가질 수 있게 게인 스케줄(gain schedule)기법이 필요하다.

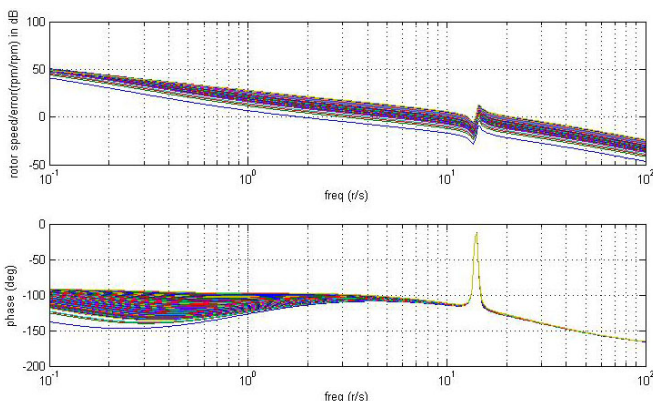


Fig. 6 Frequency response of a pitch control loop

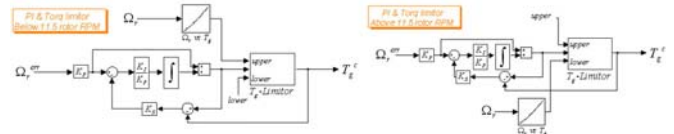


Fig. 6 Torque controller

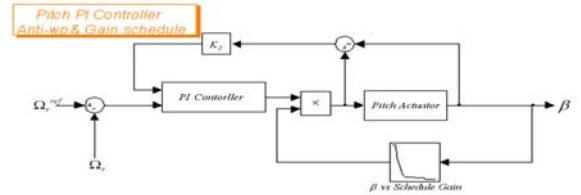


Fig. 7 Pitch control loop

### 4. 제어기 설계

Fig.7은 토크 제어기의 구조를 나타낸 것으로 토크 제어기는 로터 회전속도 범위의 중간 속도를 기준으로 전과 후로 그 구조가 차이가 난다. 그림의 테이블 데이터는 I 영역에서 Max  $C_p$  값을 추종하기 위한 테이블이다. II 영역에서는 고정된 로터 회전속도에 대하여 PI 제어기의 작동으로 원하는  $T_g^c$  값을 출력한다.

Fig.8은 토크 제어 루프를 나타낸 것으로 토크 제어기와 동일한 기본적인 PI 제어기와 Fig.7의 토크 리미터와 같이 피치 액츄에이터의 포화(saturation)특성으로 인해 발생하는 적분누적 문제를 해결하기 위한 적분기 반와인드업(integrator anti-wind up)구조로 구성된다. 또한 변화하는 풍속에 대하여 적절한 피치제어가 이루어 지도록 게인스케줄 구조도 포함된다.

### 5. 결론

본 논문에서는 풍력 터빈의 출력이 파워 커브를 추종하는 제어 시스템의 설계를 다루었다. 풍력 발전기의 제어 시스템은 크게 토크 제어와 피치 제어로 나눌 수 있다. 먼저 제어기 설계에 앞서 제어할 대상인 풍력 터빈의 특성을 파악해야 한다. 풍력 터빈은 바람에 의해 발생하는 공력토크로 인해 작동하는데 그 특성이 비선형적이다. 따라서 풍력 터빈의 동적 거동을 적절한 수학적 모델링을 통해 운동 방정식을 유도하고 도출된 모델의 선형과 과정을 거치는 것이 제어기 설계를 위한 기본이다. 선형화된 모델의 주파수 응답이나 근극제 해석법을 통해 PI 제어기의 비례제어 게인, 적분제어 게인을 적절히 설정하여야 한다. 또한 PI 제어기 사용으로 인한 적분 누적 문제와 피치 제어기의 게인 스케줄 등을 고려하여야 풍력 터빈의 제어 시스템이 정상적으로 작동한다.

풍력 터빈의 제어 전략에 맞는 제어기를 설계하기 위하여 앞서 언급한 토크 제어와 피치제어, 이들 상호간의 적절한 제어가 수행되어야 하고, 특정 로터 회전 속도를 기준으로 작동하는 토크 제어기와 정격 풍속 이상에서 작동하는 피치제어기는 각각의 작동 모드를 적절히 변환할 수 있는 모드 변환 장치가 있어야 원하는 결과를 얻을 수 있다.

### 후기

본 결과물은 지식경제부의 출연금으로 수행한 풍력핵심기술 연구센터 사업의 연구결과입니다.

### 참고문헌

1. Fernando D. Bianchi, Hernan De Battista, Ricardo J.Mantz, "Wind Turbine Control Systems", Springer, 2007.
2. E. Hau, "Windturbines: Fundamentals, Technologies, Application and Economics", Springer, 2<sup>nd</sup> Edition, 2005.
3. E. A. Bossanyi, "GH Bladed Theory Manual", 2008.
3. 남운수, 윤태준, 박종식, "풍력 터빈의 피치 제어", 2008 제어자동화시스템 심포지엄 논문집, 41-44, 2008.