

풍력터빈의 LQR 제어와 PI 제어의 성능 비교

Performance comparison of LQR and PI control for a wind turbine

*# 임창희¹, 조장환¹, 남윤수¹

*# C. H. Im(ich_me@kangwon.ac.kr)¹, J. H. Cho¹, Y. Nam¹

¹강원대학교 기계메카트로닉스 공학과

Key words : Wind turbine control, LQR control, PI control

1. 서론

풍력발전 시스템(wind turbine generator system, WTGS)은 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, 풍력발전 시스템의 입력인 바람의 운동에너지에 대한 전기적 출력을 파워계수(power coefficient)라 불리는 C_p 로 그 효율을 나타낼 수 있다.[1] 출력과 위의 효율을 최대로 높이기 위해서는 풍력발전기의 전 작동영역에서 C_p 값을 일정하게 유지해야 한다. 그러기 위해서는 로터의 회전속도와 피치각(pitch angle)을 일정하게 유지하여야 한다. 하지만 일정풍속 이상에서는 풍속이 증가함에 따라 풍속의 3승에 비례하여 생산되는 출력을 정격출력으로 유지하기 위해 C_p 값을 낮춰주어야 한다. 그에 따라 각 작동영역에서 풍력발전기의 제어요소인 피치각과 반력토크(generator torque)를 제어해야 한다.

본 논문은 풍력발전기의 제어 방식에 있어 현재 대부분의 풍력발전기에서 사용하고 있는 PI 제어 구조를 LQR 제어 구조와 비교하여 성능을 비교 평가하였다.

2. 제어 구조

Fig. 1에서처럼 풍력발전기의 작동영역은 3가지로 나눌 수 있다. 정격풍속 이전의 I-영역과

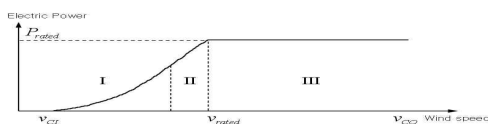


Fig. 1 Power curve

II-영역 그리고 정격풍속 이후의 III-영역으로 나뉜다. I-영역은 $Max-C_p$ 구간으로 C_p 가 최대가 되도록 제어되는 구간이다. II-영역은 천이영역(transition region)으로 같은 I-영역과는 다르게 로터 속도의 제약에 따라 선단속도비(tip speed ratio)가 줄어들게 된다. III-영역은 정격 출력 유지 영역으로 풍력터빈의 출력은 풍속증가에 따라 풍속의 3승에 비례하고 그에 따라서 정격 출력을 유지하여야 한다. 그에 따라서 C_p 을 낮춰야하고 C_p 을 낮추기 위해 피치각을 조절하여 정격 출력을 유지할 수 있다.

2. 1 PI 제어 구조

풍력발전 시스템의 제어구조는 Fig. 2의 첫 번째 알고리즘과 같이 피치제어 루프와 토크제어 루프로 구성되어 있다. 피치제어 루프는 정격이전의 영역에서는 일정한 피치 β 값을 내도록 작동되고, 정격 이후의 영역에서만 PI제어기의 동작이 이루어진다. 토크제어 루프는 PI제어기와 토크리미터(torque limiter)를 사용하여 발전기 반력토크 명령을 생성해 준다.[2] 정격회전속도 이전의 영역에서는 $Max-C_p$ 조건에 맞도록 발전기 반력토크를 생성하여 로터의 회전속도를 조절한다. 정격회전속도 이상 조건에서 피치제어 루프는 로터의 회전속도를 일정하게 조절하기 위하여 피치각을 조절하고 토크제어 루프는 PI제어기 작동에 의해 정격회전속도를 유지하도록 토크 명령을 생성한다. 로터의 회전속도와 피치각을 조절함으로써 C_p 값을 증가 또는 감소시켜 풍력발전기의 정격출력을 일정하게 유지시킨다.

2. 2 LQR 제어 구조

6dB이상의 게인 여유와 60° 이상의 위상 여유를 보장하는 LQR 제어는 식 (1)의 선형 시스템에

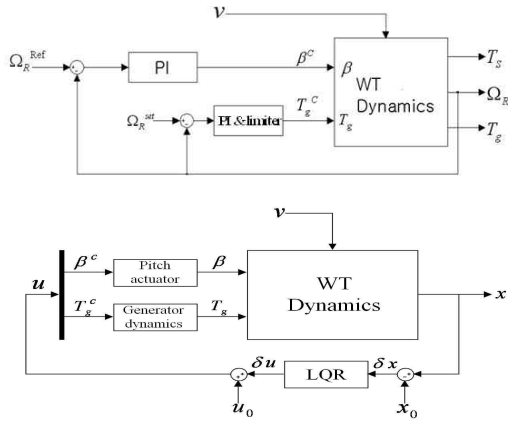


Fig. 2 Control structure of the variable speed variable pitch type

대하여, 아래의 성능 지수(performance index)를 최소화시키는 최적 제어 입력을 구하는 문제이다.

$$\delta \dot{x} = A\delta x + B\delta u \quad (1)$$

$$\delta y = C\delta x + D\delta u$$

$$J = \int_0^{\infty} (\delta x' Q \delta x + \delta u' R \delta u) dt \quad (2)$$

이 문제에 대한 해는 아래의 matrix 대수 Riccati 방정식을 풀어 구할 수 있다. 즉, LQR 최적 제어 입력은 아래와 같이 결정된다.

$$\delta u = -k\delta x$$

$$k = R^{-1}B^T P$$

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (3)$$

각 작동 풍속으로 선형화된 작동포인트에 맞춰서 성능지수를 최소화시키는 Q,R값을 찾고 거기에 해당하는 각 풍속에 대한 K값을 선정하여 사용하였다.

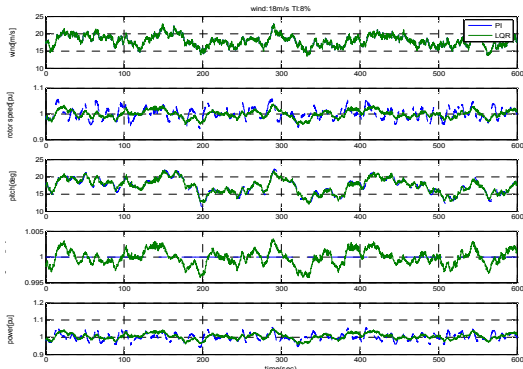


Fig. 3 Simulation results of applying the PI controller and LQR controller

3. 시뮬레이션

Fig 3 은 피치 피드포워드 제어를 적용한 GH Bladed 시뮬레이션 결과이다. 로터의 회전속도와 발전기 토크(generator torque), 출력은 정격출력 값으로 무차원화 시킨 PU(Per Unit)로 나타내었다. 첫 번째 창에 나타난 그래프는 허브높이에서 실제 풍력터빈으로 불어오는 풍속이고, 그 다음부터 로터스피드, 피치 각, 발전기 토크, 출력으로 도시되어 있다.

전체적으로 PI 제어와 LQR 제어가 유사함을 보인다. 하지만 피치 응답에서 나타나듯이 PI 제어 응답보다 LQR 제어의 응답속도 좀더 빠른 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 LQR 제어는 풍속에 관한 입력 받아 사용하고 PI 제어는 로터스피드의 에러를 사용하기 때문이다. 그러한 이유로 로터스피드의 변동이 PI 제어 응답보다 LQR 제어 응답이 좀더 안정적인 양상을 보인다.

4. 결론

대부분 풍력발전기의 제어전략으로 PI 제어를 사용한다. 하지만 여러 제어전략들이 있고 각 제어 전략들은 각각의 고유한 특성이 있다.

본 논문은 풍력발전기의 PI 제어와 LQR 제어의 성능에 대해서 비교하였다. PI 제어와 LQR제어의 알고리즘을 소개하고 제어시스템의 구성 및 원리에 대해 설명하였다. 또한 시뮬레이션을 통하여 제안된 알고리즘의 성능을 비교하였다. 추후 풍력발전기의 성능뿐만이 아니라 하중 관점에서의 비교도 검증되어야 한다.

후기

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No2008NBLHME080000)

참고문헌

1. T. Petru and T. Thiringer, "Modeling of wind turbines for power system studies," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 17, no. 4, pp. 1132-1139, 2002.
2. Tusty, J., Smith, S. and Zamudia, C., "Operation Planning Based on Cutting Process Model," *Annals of the CIRP*, 39, 517-521, 1990.