

MW 풍력터빈의 정상상태 해석 Steady State Analysis of a MW Wind Turbine

*#김정기¹, 박종식¹, 남윤수², 최명현³

*J. G. Kim¹(jeonggi@kangwon.ac.kr), J. S. Park¹, Y. S. Nam², M. H. Choi³

¹ 강원대학교 대학원 메카트로닉스 공학과, ² 강원대학교 기계메카트로닉스 공학부, ³ 강원대학교 메카트로닉스 전공

Key words : wind turbine, steady state, operating point, power curve

1. 서론

풍력터빈(WT, wind turbine)이 kW에서 MW로 용량이 증가함에 따라 풍력터빈의 크기도 대형화되고 있다. 따라서 회전 날개인 로터(rotor)나 타워(tower) 등과 같이 풍력터빈 구조물의 크기도 증가하므로 이에 따른 대형 구조물에 대한 안전성이 요구된다.

풍력터빈은 지나가는 바람을 전기에너지로 회수하기 때문에 바람에 의해 발생하는 하중이 가장 주요한 인자이다. 또한 바람의 특성 자체가 일정하지 않고 수시로 변하는 난류(turbulence) 특성을 포함하므로 난류를 포함한 바람에서 기계적 하중을 줄이고 좋은 품질의 전력을 생산해야 하므로 제어 시스템의 제어 전략과 구조는 매우 중요한 요소이다.

제어 시스템의 설계를 위해서 제어할 대상인 풍력터빈의 특성을 면밀히 분석해야 한다. 풍력터빈은 자체가 비선형 시스템으로 그 특성을 잘 파악하기 힘들다. 따라서 비선형 시스템을 선형화시켜 동적특성(dynamic characteristic)을 파악하고 동적특성에 맞는 제어시스템을 설계해야 한다.

본 논문은 동적특성 해석을 위한 선행 연구로 풍력터빈의 제어전략을 소개하고 정상상태에서의 풍력터빈의 특성 해석을 통해 제어전략에 맞는 작동점을 정의하고 작동점에서의 풍력발전기 출력특성에 관한 연구이다.

2. 풍력터빈의 정상상태

이 절에서는 풍력터빈이 정상상태를 정의하고 정상상태를 갖기 위한 조건에 관해 논의 한다.

풍력터빈은 바람에너지를 전기에너지로 변환하는 과정에서 기계적에너지, 회전운동 에너지를 전기에너지로 변환해야 하는데 이때 필요한 것이 발전기(generator)다. 일반적인 유도 발전기(induction generator)의 경우 발전기의 회전자(generator rotor)가 속도를 가지고 회전하게 되면 이에 해당하는 유도 전압이 생성되어 전기 발전이 이루어진다. 유도 전압에 의한 유도 전류는 회전자계에 발전기의 회전자의 운동방향에 반대인 발전기 반력토크(generator reactive torque)를 발생시킨다.

풍력터빈은 로터부터 발전기까지 연결되어 있으므로 로터에서 발생하는 공력토크(aerodynamic torque)와 반대 방향인 발전기 반력토크를 발생시킨다. 발생하는 발전기 반력토크를 잘 조절하게 되면 로터의 회전속도를 제어할 수 있게 된다.

따라서 로터의 회전운동을 발생시키는 공력토크의 증가 또는 감소에 따라 로터의 회전속도 또한 변하게 된다.

이러한 공력토크는 풍속과 로터 블레이드(blade)의 형상에 따라 결정되는데 공력토크와 발전기 반력 토크와 평형이된 상태, 즉 합력 토크가 0 이 되는 상태를 정상상태로 정의한다.

만약, 로터에 발생하는 공력 토크가 순간 순간 변화하게 된다면, 즉 공력토크가 발전기 반력 토크보다 증가, 감소하게 된다면 로터의 회전속도 또한 변하게 되므로 정상상태에 도달하기까지 일정시간이 걸릴것이다. 따라서 풍속의 변화가 오랜시간에 걸쳐, 예를 들면 하루를 주기로 일정한 풍속이 풍력터빈에 불어오게 된다면 과도상태

(transient state)의 특성은 무시할 수 있는 정상상태를 계속 유지할 것이다.

3. 풍력터빈의 제어전략

풍력터빈은 바람에너지를 회수하여 전기에너지로 변환한다. Fig. 1은 가변속 피치제어(variable speed pitch regulated)의 풍력터빈의 파워커브(power curve)로 풍속에 따른 풍력터빈의 전기적 출력을 나타낸 것이다. 풍력터빈의 작동구간을 크게 두개의 영역으로 나눌 수 있다. 그림의 I 영역은 풍력터빈의 효율을 최대로 하는 영역이고 III 영역은 풍력터빈의 출력을 일정하게 하는 영역이다. II 영역은 최대 효율에서 정격출력으로 넘어가는 과도적인 영역이다.

풍력터빈의 출력(electrical power)은 식(1)로 결정된다.

$$P_E = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) V^3 \quad \begin{matrix} \rho: \text{공기밀도} \\ R: \text{로터반경} \end{matrix} \quad (1)$$

식(1)에서 알 수 있듯이 풍속이 증가할수록 풍속 V의 3승에 비례하는 전기에너지를 생산한다. 풍속에 비례하여 출력을 얻는 것이 이상적이지만 실제적으로 기계구조물의 안전성과 경제적인 측면에서 일정풍속 이상에서는 풍력터빈의 효율을 낮춰 일정한 출력을 얻어야 한다.

풍력터빈의 효율은 식(1)에 나타난 $C_p(\lambda, \beta)$ 값에 의해 결정되는데 C_p 값이 높을수록 높은 효율을 나타낸다.

Fig. 2는 선단속도비에 따른 C_p 를 나타낸것으로 피치각에 따라 그 특성이 다르게 나타난다. 즉, C_p 는 풍력터빈의 피치각과 선단속도비에 의해 결정된다. 따라서 파워커브의 I 영역에서는 정격풍속에 이르기까지 효율을 최대로 하는 Max C_p 값을 유지하도록 해야 하므로 Max C_p 값을 얻을수 있는 일정한 λ^* 와 β^* 값을 유지해야 한다. 피치각을 β^* 로 고정시키고 일정한 λ^* 를 유지하기 위해서는 풍속에 비례하여 로터의 회전속도를 제어해야 한다. 로터의 회전속도를 제어하기 위해서는 앞에서 언급했듯이 발전기 반력토크를 조절하여 로터의 회전속도를 제어할 수 있다.

정격풍속 이후 일정한 출력을 얻기 위해서는 C_p 값을 점차적으로 낮춰 효율을 줄여야 한다. C_p 값을 낮추기 위해서는 피치각을 조절하여야 한다.

풍력터빈의 정상상태인 조건, 즉 바람이 일정한 풍속으로 불어온다면 파워커브의 풍속에 따른 출력을 얻기 위해서는 각 풍속에 맞는 λ_0 와 β_0 값이 존재해야 한다.

결국 제어전략에 부합되는 Ω_R, β 값이 결정된다. 따라서 풍속 V, 로터스피드 Ω_R , 피치각 β 이 세가지 파라미터에 의해 풍력터빈의 작동상태를 정의할 수 있고 제어전략에 맞는 값을 설정해야 한다. 제어전략에 부합되는 이 3가지 파라미터의 값들을 풍력터빈의 작동점으로 정의한다.

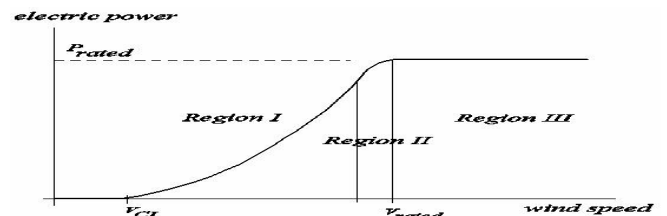


Fig. 1 Power Curve

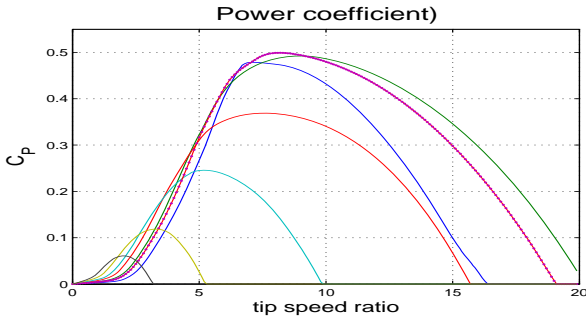


Fig. 2 Power Coefficient

4. 정상상태에서의 풍력터빈 작동특성

Fig. 3 은 풍력터빈의 피치각이 β^* 로 일정할 때의 공력토크를 로터 회전속도에 대하여 나타낸 것으로 풍속이 증가함에 따라 공력토크의 형태가 다른 것을 알 수 있다.

각각의 풍속에 대해 정상상태에서 로터의 정격 회전속도 이하의 바람에서는 굽은 라인인 Max C_p 선도를 따라서 작동점이 변하고 정격 회전속도에 도달하면 효율을 떨어뜨려 로터의 정격 회전속도를 유지한 상태, 즉 점선라인을 따라 수직으로 상승하여 정격출력을 나타내는 라인과 만나는 지점에서 풍력터빈이 동작한다.

따라서 Max C_p 를 추종하기 위해 로터의 회전속도를 제어하기 위해 토크제어가 이루어져야 하고 로터 회전속도를 일정하게 하기 위해서 피치각을 이용하여 C_p 값을 조절하는 피치제어가 이루어져야 한다.

Fig. 4 는 풍력터빈에 정격 이상의 풍속 V_0 로 로터 회전속도에 따른 공력토크를 나타낸 것으로 피치각이 증가함에 따라 발생하는 공력토크의 크기가 줄어드는 것을 알 수 있다. 굽은 라인인 Max C_p 조건인 β^* 일 때 공력토크로 로터의 정격 회전속도 이상에서 피치각을 조절하지 않는다면 정격출력 보다 높은 출력이 나오므로 일정한 출력을 유지할 수 없다.

따라서 정격풍속 이상의 조건에서 로터의 정격회전 속도를 맞추기 위해 풍력터빈의 효율을 줄일 수 있는 피치제어를 사용하여 정격출력으로 고정시켜야 한다.

다음은 풍속조건에 맞는 로터의 회전속도, 피치각인 작동점을 알아본다.

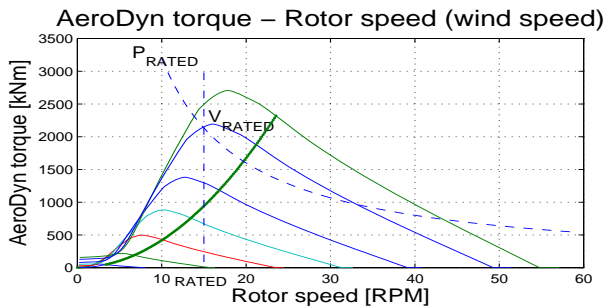


Fig. 3 Aerodynamic torque - Rotor speed

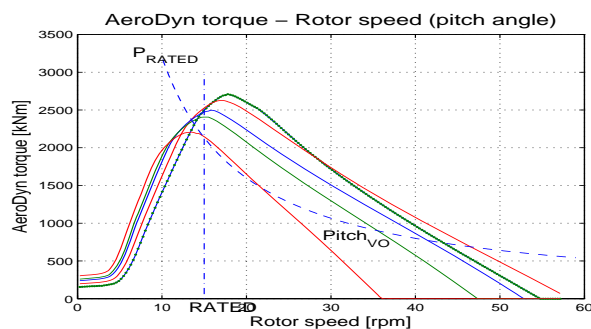


Fig. 4 Aerodynamic torque - Rotor speed

Fig. 5 는 풍력터빈에 시동풍속(cut in wind speed)부터 중단풍속(cut out wind speed)까지 일정하게 불어올 때, 즉 정상상태에서의 작동점을 나타낸것이다.

정격풍속 이하에서는 로터의 회전속도를 조절하여 에너지 회수 효율을 크게 하고 정격풍속 이상에서 피치각을 조절하여 출력을 일정하게 한다.

풍력터빈의 작동점이 그림과 같을 때 풍력터빈의 출력이 최대 효율을 가지는 구간과 정격출력으로 조절되는 것을 알 수 있다.

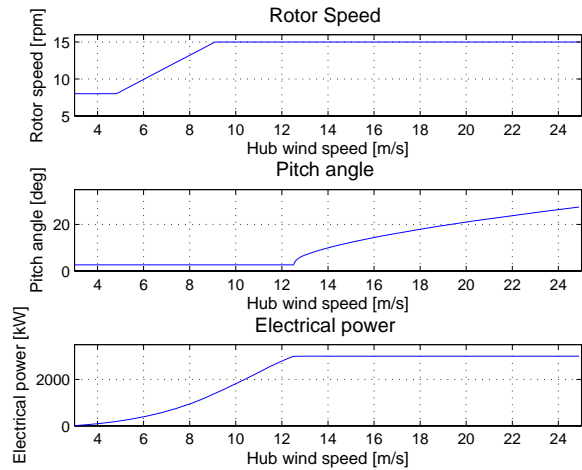


Fig. 5 Wind turbine operating point and Electrical Power

5. 결론

본 논문에서는 비선형 시스템인 풍력터빈의 제어시스템의 설계를 위한 선형 연구로 풍력터빈의 정상상태 특성을 해석을 통해 제어전략에 맞는 작동점을 정의하였다.

비선형 시스템 자체를 제어하는 것은 매우 어려운 일이기 때문에 선형화 시키는 과정이 필요한데, 선형과 과정에 있어서 작동점을 기준으로 하여 선형화한다.

풍력터빈의 작동점은 풍속, 로터의 회전속도, 블레이드 피치각 이 3 가지의 파라미터에 의해 결정된다. 정상상태에서의 풍속, 로터 회전속도, 피치각이 변화할 때 풍력터빈의 공력토크, 출력이 어떻게 변화하는지 알아보았고, 제어전략에 맞게 작동점을 정의하였다.

후기

본 결과물은 지식경제부의 출연금으로 수행한 에너지자원인력양성(학술진흥) 사업의 연구결과입니다.

참고문헌

1. E. Hau, "Windturbines: Fundamentals, Technologies, Application and Economics", Springer, 2nd Edition, 2005.
2. F. D. Bianchi, H. D. Battista, R. J. Mantz, "Wind Turbine Control Systems Principles, Modelling and Gain Scheduling Design", Springer, 2007.
3. 남운수, 윤태준, 유능수, "작동 조건 변화에 따른 풍력발전 시스템의 동적 특성 해석", 대한기계학회 논문집 A, 33, 42-48, 2009.