

MW급 풍력터빈의 천이영역 가변피치 작동방식의 효율성

The Efficiency of a MW-class Wind Turbine Using Variable Pitch in Transition Region

*#김정기¹, 남윤수², 최한순², 조장환²

*J. G. Kim(jeonggi@kangwon.ac.kr)¹, Y. S. Nam², H. S. Choi², J. H. Cho²

¹ 강원대학교 기계메카트로닉스공학과, ² 강원대학교 기계메카트로닉스공학과

Key words : Wind turbine, Variable pitch, Annual energy product, Power curve

1. 서론

풍력터빈(wind turbine)은 바람에너지를 전기에너지로 변환하는 일종의 에너지 변환시스템이다. 바람이 갖고 있는 에너지의 회수율을 어떻게 설정할 것인가가 풍력터빈의 설계에 있어서 중요한 영향을 미치게 된다. 실제로 풍력터빈 로터(rotor) 블레이드(blade)의 형상에 따라 에너지 회수 효율이 결정되기도 하지만 [1] 실제 풍력터빈의 운영에 있어서 어떠한 제어전략을 운영하는가에 따라 에너지 회수율이 결정된다. [2] 풍력터빈의 용량이 점점 커짐에 따라 최근의 수 MW급 풍력터빈은 로터 블레이드의 직경이 100미터 내외의 거대 구조물이다. 로터의 회전반경이 증가됨에 따라 기계적 부하나 소음등 여러 가지 문제로 인해 로터의 회전속도에 대한 제한이 생기게 된다. [4]

MW급 풍력터빈의 경우 기계적 부하나 에너지 회수율을 고려할 때 가변속도 가변피치(variable speed variable pitch)방식을 많이 채택하고 있다. [3] 가변속도 가변피치는 정격풍속(rated wind speed) 이전에서 풍력터빈의 에너지 회수 효율을 높이기 위해 가변속도로 발전하고, 정격풍속 이후에서 일정한 전기적 출력을 유지하기 위해 피치제어를 사용하는 방식이다. 이러한 방식은 고정속도 발전방식에 비해 풍력터빈의 작동 운영범위가 증가하고, 실속제어에 비해 블레이드에 가해지는 하중의 크기를 감소시킬 수 있다. [4]

가변속도 가변피치 방식에 있어서 최대 에너지 회수구간과 정격출력 유지구간 사이의 천이구간이 발생한다. 로터의 회전속도가 정격풍속 이전의 풍속에서 정격속도에 도달하기 때문에 최대에너지 회수를 위한 풍속에 비례하는 회전속도를 얻을 수 없기 때문에 발생한다. 천이영역에서의 일반적인 방법은 피치각을 고정시키는 방법을 사용한다. [4] 본 논문에서는 천이영역의 작동방식에 있어서 고정된 피치를 사용하지 않고 가변피치 사용에 따른 에너지 회수율을 연간 에너지 생산량(annual energy product, AEP)을 비교함으로써 그 효율성에 대해 평가한다.

2. 풍력터빈의 작동방식

Fig.1은 가변속도 가변피치를 사용하는 MW급 풍력터빈의 파워커브로 풍력터빈으로 불어오는 바람에 대한 전기적 출력을 나타낸 그림이고 풍력터빈의 전기적 출력은 식(1)에 의해 결정된다.

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

ρ : 공기밀도, v : 풍속
 R : 로터반경, β : 피치각
 λ : 선단속도비 ($\lambda = (R\Omega_r)/v$)
 Ω_r : 로터회전속도

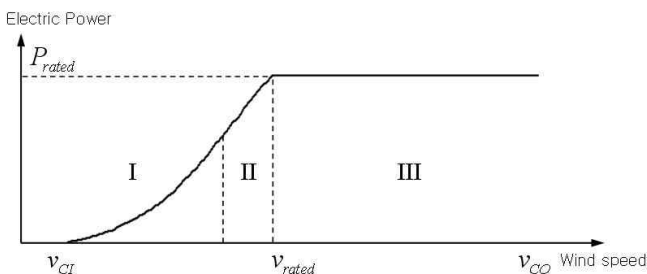


Fig. 1 Power curve

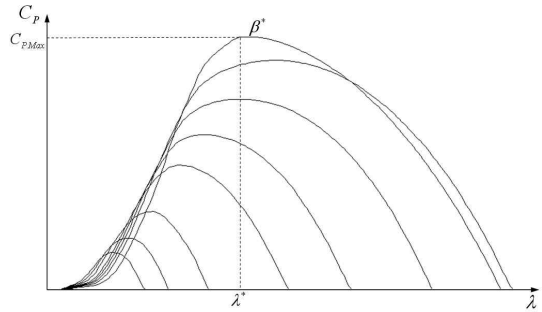


Fig. 2 Power coefficient

식(1)에서 보듯이 풍력터빈의 전기적 출력은 풍력터빈으로 불어오는 바람 v 에 대하여 C_p 값의 변화에 따라 그 출력이 결정되는 것을 알 수 있다. 여기서 C_p 는 파워계수(power coefficient)로 바람에너지로부터 전환되는 전기적에너지의 에너지 회수 효율을 말한다. C_p 는 풍력터빈의 선단속도비(tip speed ratio) λ 와 피치각 β 에 의해 결정되는데, 그 특성은 Fig.2에 나타나 있다. 여기서 각각의 그래프는 특정피치각 β^* 를 기준으로 피치각이 증가함에 따라 나타낸 것으로 일반적으로 피치각이 증가할수록 최대값이 낮아지는 것을 알 수 있다.

풍력터빈의 작동영역은 크게 3개의 영역으로 나눌 수 있다. I-영역은 풍력터빈의 에너지 회수 효율을 최대화 하는 영역으로 C_p 값이 최대가 되게 작동되어야 한다. 따라서 풍력터빈의 작동조건이 일정한 피치각 β^* 와 λ^* 를 만족하도록 작동되어야 한다. 따라서 이 작동영역에서는 피치각을 고정시키고 풍속에 비례하여 로터의 회전속도를 제어하게 된다. III-영역은 풍력터빈의 출력이 일정하게 유지되는 구간으로 풍속의 3층에 반비례하게 피치각을 점차 증가시켜 풍력터빈의 에너지 회수율을 감소시켜 일정한 출력을 내도록 한다.

I-영역과 III-영역사이의 천이구간인 II-영역이 존재하는데, 정격풍속 보다 낮은 풍속에서 로터의 회전속도가 정격회전속도에 도달하기 때문에 발생한다. Fig.3은 풍속에 따른 선단속도비를 나타낸 그림으로 로터의 회전속도가 풍속에 비례하여 증가되지 못하기 때문에 풍속이 증가함에 따라 일정한 선단속도(tip speed)를 갖는 풍력터빈의 선단속도비가 천이구간에서 λ^* 값보다 낮아지게 된다. 선단속도비의 감소로 인해 C_p 값을 최대로 유지하지 못하고, 점차 낮아지게 된다.

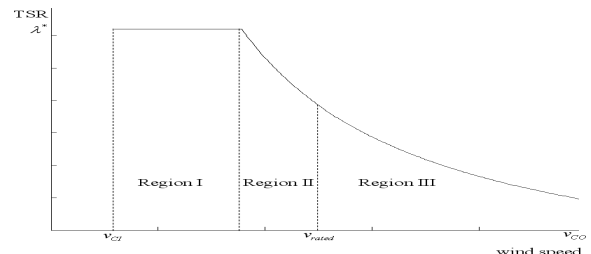


Fig. 3 Tip speed ratio

3. 천이영역에서의 가변피치

천이영역에서의 선단속도비의 감소는 결국 C_p 값을 감소시키게 되고 결국 풍력터빈의 에너지 회수율을 떨어뜨리게 된다. MW급 풍력터빈의 일반적인 작동방식은 천이영역에서 피치각을 β^* 값으로 고정하고 사용한다. 하지만 변하는 선단속도비에

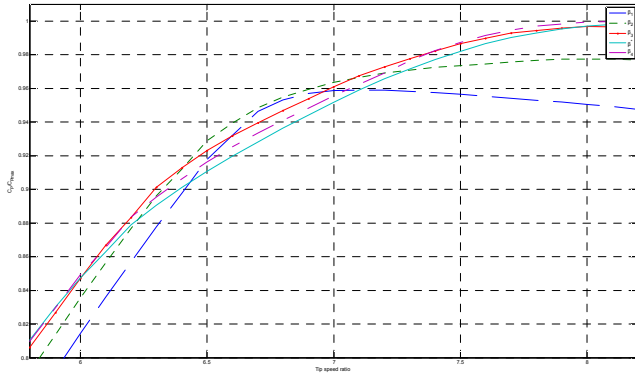


Fig. 4 power coefficient at tip speed ratio variation

대응하는 C_{Pmax} 는 β^* 의 조건일 때 만족하지 않는다. 즉, 변화하는 선단속도비에 대해 C_{Pmax} 값을 만족하는 피치각은 달라지게 된다. 따라서 변화하는 선단속도비에 해당하는 C_{Pmax} 의 조건인 새로운 피치각으로 제어된다면 풍력터빈의 천이영역에서의 에너지 회수 효율은 높아질 것이다.

Fig.4는 선단속도비 변화에 따른 C_p 값의 변화를 나타낸 그림으로 천이영역에서의 C_p 값이 최대가 되는 조건의 피치각이 각각 달라지는 것을 알 수 있다. 따라서 변화하는 선단속도비에 따라 피치각을 변화시키면 풍력터빈의 천이영역에서의 에너지 회수 효율을 증가시킬 수 있다. Fig.5는 선단속도비 변화에 따른 C_{Pmax} 조건을 계산하여 풍속에 따라 천이영역에서의 피치각을 계산한 그림이다.

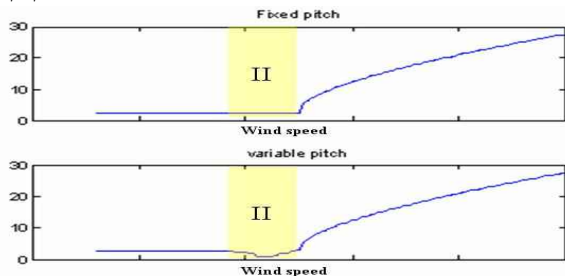


Fig. 5 Fixed and variable pitch angle

4. 가변피치 방식의 효율성

가변피치 방식의 효율성을 판단하기 위해 AEP, 연간 에너지 생산량을 계산하여 비교한다. 효율성의 비교에 있어서 피치액츄에이터(pitch actuator)의 작동빈도에 따른 기계적인 부하에 의한 영향은 배제하였다.

AEP를 산출하는 방법은 "method of bins"에 의한 방법을 사용하였고 풍속 누적확률 분포함수를 적용함에 있어서는 IEC-61400-121에서 제안하는 와이블(weibull)의 형상계수(shape factor)가 2인 레일리(rayleigh) 누적확률 분포함수를 사용하였다.[5] 따라서 AEP값은 식(2)에 의해 결정된다.

$$AEP = \sum_{i=1}^N \frac{(P_{i-1} + P_i)}{2} \{F(v_i) - F(v_{i-1})\} \times 8760 (kWh) \quad (2)$$

P_i : i -번째 풍속간의 풍력터빈의 출력(kW)
 v_i : i -번째 풍속간의 풍속(m/s)
 $F(v_i)$: Rayleigh 누적확률 분포함수

풍속영역 3m/s~25m/s 구간에 대하여 0.5m/s 간격으로 풍속간을 결정하였다. 또한 측정 지역마다 평균풍속이 다르기 때문에 IEC-61400-121에 따라 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11m/s 평균풍속에 대하여 계산하였다.[5]

산출된 AEP는 Table 1과 같다. 각각의 평균풍속마다 천이영역에서의 가변피치 방식을 사용하는 것이 더 많은 전력을 생산한 것을 볼 수 있다. 천이영역에서 고정된 피치각을 사용할 때와 비교해보면 AEP값이 최소 0.07%, 최대 0.28% 증가되는 것을 알 수 있다.

Table 1 Annual energy product

$v_{mean} (m/s)$	AEP (MWh)		$\frac{AEP_2 - AEP_1}{AEP_1} \times 100 (\%)$
	Fixed type(AEP1)	Variable type(AEP2)	
4	1812.1	1813.4	0.07
5	3560.0	3566.4	0.18
6	5727.9	5742.3	0.25
7	8029.2	8051.3	0.28
8	10230.0	10257.8	0.27
9	12183.0	12214.7	0.26
10	13803.5	13837.4	0.25
11	15051.4	15086.3	0.23

5. 결론

가변속도 가변피치 방식을 사용하는 최근의 MW급 풍력터빈은 크기가 대형화 되면서 풍력터빈 로터의 회전속도는 정격풍속보다 낮은 풍속영역에서 정격속도에 도달하게 된다. 이에 따라 풍력터빈의 천이영역이 발생되고 천이영역에서의 에너지회수 효율이 감소하게 된다. 이에 본 논문은 천이영역에서 에너지 회수율을 높이기 위한 가변피치 방식에 대해 논의하였다. 풍력터빈의 특성에 의해 가변피치를 사용할 경우 에너지 회수율을 좀 더 높일 수 있으며, 평가를 위해 연간에너지 생산량을 비교하였다. 실제 풍력터빈에 적용함에 있어서는 천이영역에서의 가변피치방식을 이용하기 위한 제어 알고리즘이 필요하고, 피치 액츄에이터의 혹사 정도에 관한 검토도 충분히 이루어져야 할 것이다.

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. Fernando D. Bianchi, Hernan De Battista, Ricardo J. Mantz, "Wind Turbine Control Systems", Springer, 2007.
3. E.L. van der Hooft, P. Shaak, T.G. van Engelen, "Wind turbine control algorithms", ECN-C-03-111, 2003.
4. 남윤수, "풍력터빈의 제어", GS인터비전, 2009.
5. IEC, "IEC 61400-121: Power performance measurements of grid connected wind turbines", International Electrotechnical Commission, 1st Edition, 2003