

수평축 풍력발전시스템의 피치제어 시뮬레이션

황성준\* 서영택\*\* 오철수\*  
 \*경북대학교 전기공학과, \*\*구미1대학 전기과

Pitch Control Simulation of Horizontal Wind Power System

Sung-joon Hwang\* . Young-Taek Seo\*\* . Chul-Soo Oh\*  
 \*Dept. of Electrical Engineering, Kyung-pook National Uni. \*\*Kumi College

**Abstract** - In the early development of wind energy, the majority of wind turbines were operated at constant speed. Recently, the number of variable-speed wind turbines adopted pitch control apparatus has increased

This paper deal with a simulation of pitch control of variable-speed wind turbine and the response of pitch angle is traced in a given random wind speed.

1. 서 론

풍력발전은 에너지 소비량의 급증으로 인한 부존자원의 고갈에 대한 우려와 환경문제를 고려할 때 가장 유력한 미래 대체에너지원으로 자리잡고 있다. 현재 풍력발전기의 대부분을 차지하고 있는 수평축 풍력발전기의 출력을 제어하는 방법으로는 발전기 제어부분과 날개의 영각의 제어로 발전기의 출력을 제어하는 부분으로 나눌 수 있다. 후자는 회전자 날개의 공기역학적 특성을 이용하여 발전기의 출력을 제한하는 방법이다. 그 방법에는 스톨(stall)제어와 피치(Pitch) 제어로 나누어진다. 스톨제어는 과도한 풍속이 불 경우 날개 표면에 난류를 발생시켜 속도를 줄여주는 방법이며 피치제어는 날개각을 조절함으로써 날개에 작용하는 양력을 줄여 토크를 조절하는 방식이다. 이에 본 논문에서는 피치제어를 통하여 발전기의 출력을 제어하기 위하여 날개의 공기역학적 특성을 해석하고 날개의 설계상 주어지는 주속비( $\lambda$ )와 출력계수( $C_p$ )의 관계를 이용하여 발전기의 출력특성을 해석하며 피치제어를 수행하기 위한 알고리즘을 제시한다. 또한 피치제어의 유무에 따른 발전기의 속도, 출력, 토크 등을 시뮬레이션하여 비교 분석하므로 실제 풍력발전 시스템에서의 적용가능성을 제시하기로 한다.

2. 본 론

2.1 피치제어(Pitch control)의 이론적 고찰

피치제어는 풍력발전시스템에서 날개(Blade)의 형상의 한계를 보완하기 위해 날개에 영각( $\alpha$ )을 조절하는 메카니즘이다. 풍속에 따른 효율적이고 안정적인 출력을 얻기 위하여 영각을 조절할 필요가 있는데, 피치제어의 경우 이를 위해 날개를 인위적으로 조절하여준다. 영각(Angle of attack)을 풍속에 따라 적절히 조절함으로써 일정한 출력값을 얻을 수가 있고 정격출력을 넘어서면 날개의 영각을 급속히 감소하는 방향으로 회전시켜 일정한 출력을 얻을 수가 있게 된다. 그림1은 풍력발전시스템의 개략도이며 그 구성은 바람에 의하여 직접적으로 구동되어지는 날개부분, 저속인 날개부분의 회전속도를 증가시켜 주는 증속기, 그리고 발전기, 피치제어부 등으로 되어 있다.

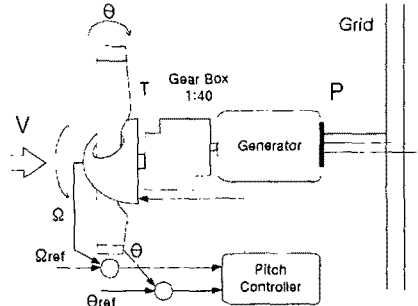


그림 1. 풍력발전 시스템의 개략도

2.2 날개의 공기역학적 해석

그림 2는 풍력발전기의 날개의 단면을 나타낸다. 일정 방향의 풍속에 대한 날개의 공기역학적인 작용을 살펴보면 다음과 같다. 날개축에 작용하는 합성풍속  $W$ 는 식(1)과 같이 날개의 절대회전속도  $r\Omega$ 와 풍속  $v$ 의 벡터합으로 나타낼 수 있으며 날개의 회전면과 날개의 chord면이 이루는 각을 피치각(Pitch angle)  $\theta$ ,  $W$ 와 날개의 chord면이 이루는 각을 영각(Angle of attack)  $\alpha$ 로 나타낼 수 있다. 날개가 합성풍속  $W$ 인 유동속에 놓이면 영각의 함수인 양력  $L(\alpha)$ 와 항력  $D(\alpha)$ 가 발생하며, 양력과 항력은 Radial 방향과 Tangent 방향의 힘으로 분해할 수 있는데, Tangent방향의 힘이 회전방향으로 작용하는 토크로 작용한다.

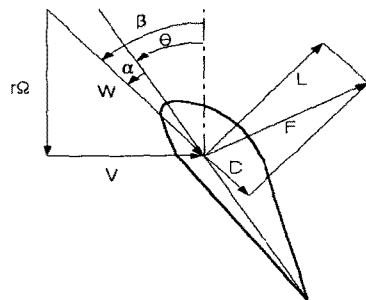


그림 2. 회전날개의 역학관계

$$W = \sqrt{(r\Omega)^2 + v^2} \tag{1}$$

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{v}{r\Omega}\right) \tag{2}$$

$$\theta = \beta - \alpha \tag{3}$$

$L(a)$ 과  $D(a)$  그리고 날개가 받는 힘( $F_{rot}$ )의 관계는 다음과 같다. ( $\rho$ : 공기밀도[ $kg/m^3$ ],  $S$ : 날개단면[ $m^2$ ],  $Cl$ :양력계수,  $Cd$ : 항력계수)

$$L(a) = \frac{1}{2} \rho C_L(a) W^2 S \quad (4)$$

$$D(a) = \frac{1}{2} \rho C_D(a) W^2 S \quad (5)$$

$$F_{rot} = L \cos \beta + D \sin \beta \quad (6)$$

한편 피치각이 커지면 양력이 약해져 날개가 힘을 받지 못하고  $F_{rot}$ 가 줄어들어 토크가 작아진다. 이것이 피치 제어의 원리가 된다.

### 2.3 풍력 발전기의 출력 특성

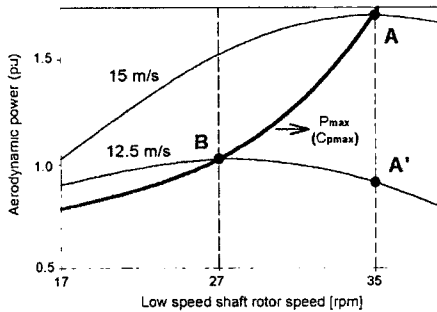


그림 3. 출력 대 로터속도

그림 3은 두 가지 다른 풍속에 따른 로터회전수에 대한 전형적인 출력특성곡선을 보여주고 있다. 굵은 선은 풍속에 대한 최대출력계수( $C_{Pmax}$ )를 고려한 최대출력  $P$ 를 나타내고 있다. 만일 15 m/s의 풍속에서 로터속도가 35rpm으로 회전할 때 최대효율을 갖는 출력을 낼 수가 있지만 정격출력값을 훨씬 넘게 된다.(A) 풍속이 12.5 m/s로 감소하면 효율이 낮은 A'점에서 발전기가 동작한다. 이 때 피치제어를 통하여 로터속도를 감소시키면 최대효율을 가지는 B점에서 발전기가 동작하게 되고 정격출력을 낼 수 있다. 여기서 로터의 회전속도와 풍속과의 비율 주속비( $\lambda$ )로 정의하고 날개형상계수에 따른 주속비에 변화는 곧 출력계수( $C_p$ )의 변화를 가져온다. 따라서 풍속에 따른 피치제어는 발전기출력에 직접적인 영향을 주게 된다. 그 출력과 토크는 아래와 같이 정의된다. ( $r$ : 날개길이[ $m$ ],  $\Omega$ : 날개의 회전속도[ $rad/s$ ],  $A$ : 날개의 회전단면적[ $m^2$ ])

$$\lambda = \frac{r\Omega}{v} \quad (7)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho C_p(\lambda) A v^3 = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda) \frac{r^3}{\lambda^3} \Omega^3 \quad (8)$$

$$T = \frac{1}{2} \rho A r^3 \frac{C_p(\lambda)}{\lambda^3} \Omega^2 \quad (9)$$

표 2.1. 풍력발전시스템의 제원

날개 수	3
로터 직경	50.5 m
로터 swept area	2003 $m^2$
Turbine 정격회전수	27.0 rpm (17~35 rpm)
Turbine 정격토크	270 kNm
정격풍속	12.5 m/s
발전기 정격(동기발전기)	3상 84극 750 kW

### 2.4 제어 알고리즘

본 논문에서는 피치제어에 관한 알고리즘과 시뮬레이션에 적용하기 위한 가변속 풍력발전시스템의 사양은 표 2.1과 같다.

그림 4는 날개의 피치를 제어하기 위한 알고리즘이다. 풍속, 날개회전속도, 발전기의 출력은 항상 변하고 이에 따른 주속비와 출력계수 역시 변화한다. 풍속, 날개회전속도, 발전기출력은 측정되어지며 순서대로 계산하면 주어진 값으로부터 실제 피치각  $\theta$ 와  $\theta_{ref}$ 의 오차( $\theta_{err}$ )를 계산할 수 있다.  $\theta_{err}$ 의 값에 따라 피치제어를 수행하게 된다. 정격출력 이하에서는 최고효율의 출력을 낼 수 있는 출력계수를 유지하도록 피치각을 제어하여 주고 정격출력 이상에서는 최고출력을 낼 수 있도록 출력계수를 유지하는 것은 발전기의 부담을 과중시키는 결과가 되어 발전기는 과부하 상태에 놓이게 되므로 이를 방지하고 발전기의 기계적 부하를 제한하기 위하여 출력계수를 낮추어 주는 방법으로 날개의 피치각을 제어하여 주는 것이다. 초기 측정치와 측정치에 따른 변화값들은 매 순간 바뀌므로 이러한 값들을 추종하는 것은 피치부분에 기계적인 부하를 가중시키는 결과를 가져온다. 이러한 부하를 줄여 주기 위하여 측정치는 일정시간 동안의 변화값들에 대한 평균값으로 사용한다.

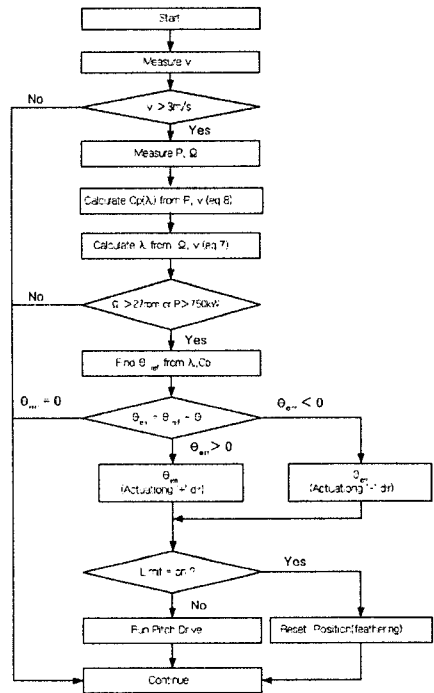


그림 4. 피치제어 알고리즘

### 3. 시뮬레이션결과 및 고찰

앞에서 언급한 수식과 알고리즘을 이용하여 프로그램에 적용하여 시뮬레이션을 해 본 결과는 다음과 같다. 본 시뮬레이션에 적용한 날개는 NACA 65-2을 모델로 하였고  $Cl$ 과  $Cd$ 의 값은 기존의 문헌에서 발췌하였다.[2] 공기밀도  $\rho$ 는  $(1.25 \pm 0.04) \times 10^{-3} kg/m^3$ 의 실용값으로 계산하였고 날개의 정격회전속도  $\Omega$ 는 2.8[rad/s]로 계산하였다. 먼저 풍속에 대해 피치제어를 하지 않았을 경우(그림5)의 로터속도는 풍속에 따라 심하게 변하므로 날개의 토크가 큰 폭으로 변하게 된다.

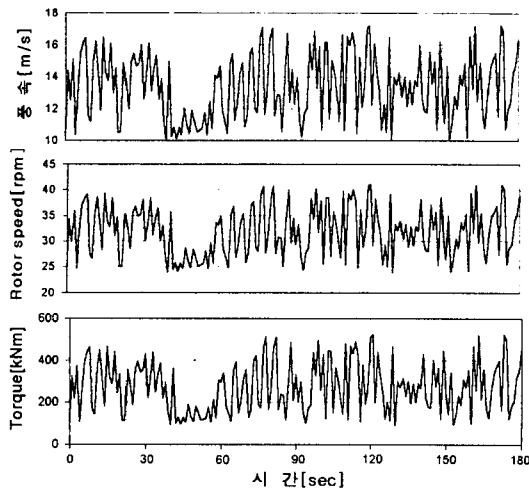


그림 5. 피치제어를 하지 않았을 때의 로터속도와 토크

그림 6은 피치제어를 하였을 경우 먼저 풍속을 10~18 m/s의 범위로 Random하게 주었을 경우에 날개의 피치각이 0° ~31°로 추종함을 알 수 있다. 그리고 피치각을 조절하면 바람으로부터 날개가 받는 회전력이 일정값으로 추종되므로 발전기는 정격에서 동작할 수 있다.

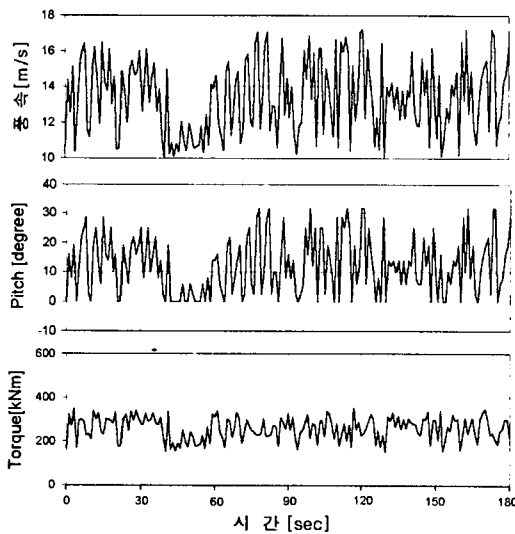


그림 6. 피치제어시의 풍속에 따른 피치각과 토크

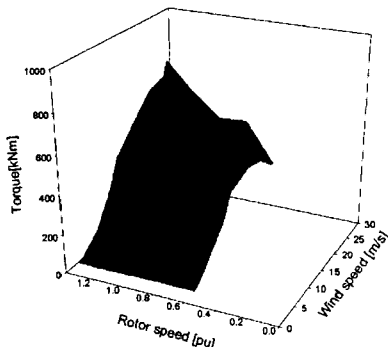


그림 7. 날개회전속도와 풍속에 대한 토크

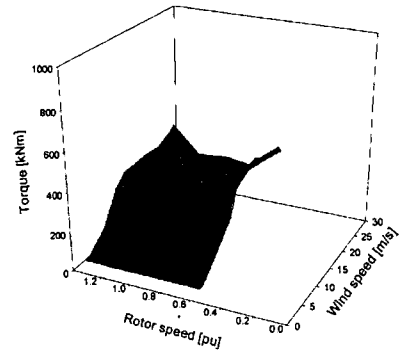


그림 8. 피치제어시 날개회전속도와 풍속에 대한 토크

그림 7은 피치제어가 이루어지지 않은 상태에서 풍속과 날개회전속도의 변화에 의해 발생하는 토크의 변화를 나타내었다. 정격출력을 발생시키는 날개회전속도는 2.8 rad/s이기에 이를 1pu로 두고 계산되었다. 정격풍속이상의 경우, 토크는 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 곧 과부하를 방지하고 정출력을 해야 하므로 발전기가 부담해야하는 부분이며 발전기제어를 통해 감당해야 한다. 그림 8은 피치제어가 이루어진 상태에서 토크변화를 나타내고 있다. 풍속과 날개회전속도의 변화에서 발생되어지는 토크의 변화는 날개회전속도가 1pu인 경우에는 비교적 토크값의 변화가 없음을 알 수 있으며, 날개회전속도의 변화에 따라 비교적 적은 토크의 변화를 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 풍력발전 시스템에서 사용한 피치제어 시스템의 알고리즘을 제안하기 위해 풍속과 날개의 회전속도 등 외부조건과 풍력발전기의 관계를 찾아내었다. 제안한 알고리즘을 이용한 풍력발전 시스템의 피치제어 시뮬레이션을 통하여 풍속에 따른 날개의 회전수가 날개의 피치제어에 현저한 영향을 받는다는 것을 확인하였고 이들 외부조건에 따른 발전기의 출력과 토크특성 변화를 시뮬레이션 하였으며, 이를 토대로 풍력 에너지량에 따라 피치제어를 수행하는 알고리즘을 제시하였다. 이를 통해 정격풍속 이상에서 정격 출력을 초과하는 출력제한을 위한 피치각을 알아내어, 피치제어를 함으로써 발전기와 동력축이 부담하여야 할 과도한 토크를 감소시킬 수 있다. 이에 피치제어의 풍력발전 시스템에 미치는 영향과 적용가능성을 제시하였다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] David M. Eggleston and Forrest S. Stoddard, "Wind Turbine Engineering Design", Van Nostrand Reinhold Company, 1987
- [2] Ira H. Abbott and Albert E. Von Doenhoff "Theory of Wing Section", Dover Publication, Inc, 1959
- [3] E. Muljadi, K. Pierce and P. Migliore, "Control Strategy for Variable Speed, Stall-Regulated Wind Turbine", Presented at American Controls Conference, Philadelphia, PA, June 24-26, 1996.
- [4] 오철수, 서영택, "다변 풍속 적용형 Darrieus-Savonius 조합 수직축 풍력 발전 시스템의 설계", 대한전기학회 논문집 제45권 제 2호, pp.185~192, 1996