

풍력발전시스템에서 피치제어 해석

이우석\*, 서영택\*\*, 황성준\*\*\*, 김철호\*\*\*\*, 오철수\*\*\*\*  
 부산정보대학\*, 구미1대학\*\*, LG전자\*\*\*, 경북대학교\*\*\*\*

Analysis of Pitch Control in the Wind Power System

Woo-Seok Lee\*, Young -Teak Seo\*\*, Sung-Joon Hwang\*\*\*, Chul-Ho Kim\*\*\*\*, Chul-Soo Oh\*\*\*\*  
 Pusan College of Info. Tech.\* , Kumi Colege\*\*, LG\*\*\*, Kyungpook N. Univ.\*\*\*\*

**Abstract** - Concerns for wind energy as alternative energy have been highly increased, because of the problems such as the global warming effect, environmental pollution, the exhausting fossil fuel, and so on. Recently, the number of variable-speed wind turbines adopted pitch control apparatus has increased.

In this paper, the mechanism between the wind energy and power generating system has been presented to specify the relationship of the energy transfer using the Pitch Control.

1. 서 론

우리 나라는 에너지 자원빈국으로서 대부분의 에너지를 수입에 의존하고 있으므로 경제적인 부담은 물론 안정된 에너지원의 확보에도 많은 문제를 안고 있다. 이와 함께 우리 나라 에너지원의 대부분을 차지하는 화석 및 원자력에너지는 여러 가지 환경문제와 핵에 대한 국민의 거부감 확산 등에 의하여 에너지의 부가비용이 점차 증가되고 있는 추세이다. 이 같은 문제점을 해결하기 위한 대안으로서 대체에너지를 고려할 수 있다. 지금까지의 대체에너지는 기존 에너지에 비해 가격 경쟁에서 뒤져왔으나 기존에너지 가격이 상승함에 따라 그 경쟁성이 향상되고 있다.

날개의 형상을 이용한 발전기 출력제어 방법은 피치제어와 스톨제어의 두가지 방법이 있다. 피치제어는 복잡한 제어회로를 포함하게 되어 구성이 복잡해지고, 구동을 위한 요소들이 추가된다는 단점이 있으므로, 과거에는 스톨제어가 그 주류를 이루었으나 풍력발전기가 대형화하면서 점차 피치제어가 우위를 점하게 되었으며, 스톨제어의 경우에도 피치제어의 특성을 도입한 능동 스톨제어 방식으로 변화해 가는 추세이다.

본 논문에서는 풍력발전시스템에서 풍력에너지와 발전시스템 사이의 메카니즘을 제시하여 피치콘트롤을 이용한 에너지 변환을 해석하였다.

2. 본 론

2.1 출력특성

로터의 회전속도와 풍속과의 비를 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.

$$\lambda = \frac{r\Omega}{v} \quad (1)$$

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

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

여기서  $C_p$  값은 출력계수(Power coefficient)를 말한다. 결국 발전기의 출력을 좌우하는 변수는 출력계수와 풍속이다.

2.2 풍력발전시스템 모델링

2.2.1 회전날개부

수평축 풍력발전기의 날개는 Tip부분에서 Root쪽으로 갈수록 날개가 Twist 되어 있다. 다시 말하면 날개의 Tip부분에는 Chord선과 회전면이 일치하지만 Root부분으로 갈수록  $\theta$  값이 증가한다. 본 연구에 사용된 NACA 65-2모델은 약 12°정도 Twist되어 있다. 그림 1은 날개의 형상을 입체적으로 그려놓은 것이다. 날개 Tip부분의 Chord길이와 Root부분의 길이와의 비를 Taper ratio라 하며 본 논문에서는 0.4로 하였다.

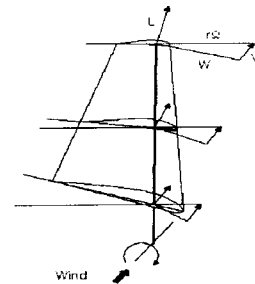


그림 1. 날개의 Twist에 따른 양력의 변화

여기서는 날개가 트위스트 됨으로 인한 날개의 Tip부분에서 허브 쪽으로 갈수록 일정한 풍속에 대한 날개의 양력과 항력의 변화와 회전력, 회전토크를 수식으로 모델링 하고 시뮬레이션을 통해 특성을 해석하고자 한다. 먼저 날개의 길이방향 미소거리를  $dr$ 라 할 때

$$\text{미소양력 } dL = \frac{1}{2} \rho C_l W' dA \quad (4)$$

$$\text{미소항력 } dD = \frac{1}{2} \rho C_d W' dA \quad (5)$$

$$\text{여기서 } dA = dr \cdot l, W'^2 = v^2 + (r\Omega)^2,$$

그리고  $\cot\beta = \frac{r\Omega}{v}$  이므로 따라서 날개의 미소길이에 작용하는 회전력은

$$dF = \frac{1}{2} \rho v^2 l (1 + \cot^2\beta) (C_l \sin\beta - C_d \cos\beta) dr [N] \quad (6)$$

식의 간략화를 위해  $\tan\epsilon = \frac{C_l}{C_d}$  를 양항비라 놓으면

$$dF = \frac{1}{2} \rho C_l l (1 + \cot^2 \beta) \left( \frac{\cos(\beta - \epsilon)}{\cos \beta} \right) dr [N] \quad (7)$$

먼저 날개의 Twist에 의한 단위길이 당 양력의 변화를 살펴보면 그림 2와 같다.

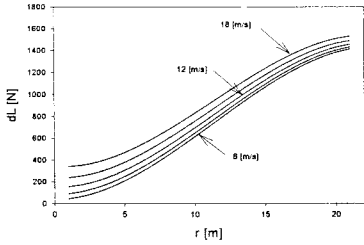


그림 2. 날개의 미소길이에 따른 양력

그림 3은 단위길이 당 날개의 회전 모멘트를 수식을 이용하여 나타낸 것이다. 풍속이 빨라질수록 날개의 회전 모멘트는 상승하는 것을 알 수 있으며 날개의 외부로 갈수록 회전 모멘트가 커진다는 것을 알 수 있다. 그리고 날개전체길이의 약 3/4 지점인 16m에서 가장 큰 회전 모멘트가 발생이 됨을 알 수 있다

그림 4는 날개길이에 따른 회전토크를 풍속에 따라 나타낸 것이다. 날개 Tip부분으로 갈수록 회전토크가 커짐을 알 수 있다.

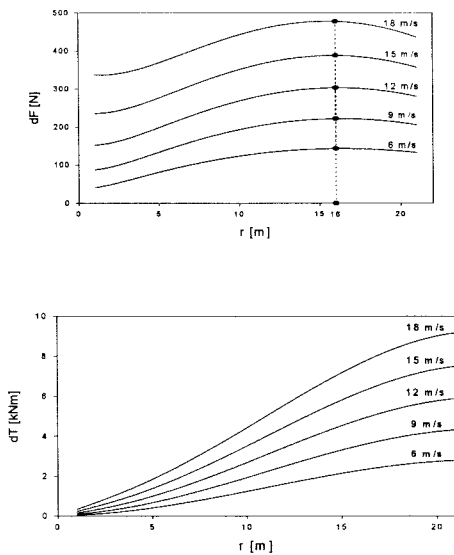


그림 4. 날개의 미소길이에 따른 회전토크

### 2.2.2 풍력발전 모델링

그림 5는 풍력발전시스템을 모델링하기 위하여 블록다이어그램을 나타낸 것이다.

풍력발전에 하기 위하여 최우선 시 되는 것은 에너지원이 되는 풍속에 대한 조사가 이루어져야 한다. 풍속의 값이 결정되면 주속비와 출력계수의 관계를 고려한 로터의 설계가 이루어지고 로터의 회전은 기계적인 손실을 가져온다. DFIG의 경우 기어박스가 장착이 되어 있어 효율이 0.94가 되나 동기기의 경우 기어박스가 존재하지 않는 직기동이기에 0.97정도가 된다. 발전기의 효율

과 계통연계를 위한 Inverter의 설계와 제어가 이루어진다.

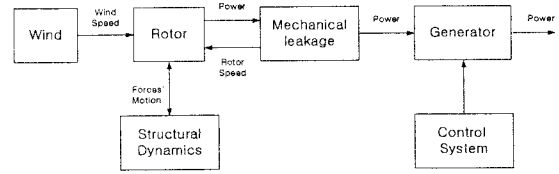


그림 5. 풍력발전시스템의 블록다이어그램

### 2.2.3 풍속 모델링

풍속에너지의 모델링을 위하여 사용되어지는 Weibull 분포함수가 사용되어진다. 이 함수를 사용하여 측정지점의 시간별, 계절별 풍속에너지의 밀도와 분포를 알 수 있으며 또한 turbulence를 알 수가 있다.

Weibull 분포함수는 바람의 발생되어지는 가능성을 나타내어주는 것으로, 일정풍속에서 발생되어지는 값과 어느 특정풍속  $v_1$ 보다 클 확률을 표시하는 누적분포함수를 다음과 같이 나타내었다.

$$P(v) = \left(\frac{K}{C}\right) \left(\frac{v}{C}\right) \exp\left(-\left(\frac{v}{C}\right)^K\right) \quad (8)$$

$$F(v \geq v_1) = \exp\left(-\left(\frac{v_1}{C}\right)^K\right) \quad (9)$$

일정풍속  $V_1$ 이상이 나올 시간의 함수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$H(v \geq v_1) = 8760 \times \exp\left(-\left(\frac{v_1}{C}\right)^K\right) \quad (10)$$

여기서 C는 분포된 풍속의 평균값에 관계하는 척도계수(scale parameter), K는 분포된 풍속의 편차의 크기를 나타내는 형상계수(shape parameter)이다.

### 2.2.4 피치 제어부

풍력발전 시스템에서 피치 제어는 출력제어와 직접 연관이 된다. 피치제어 메카니즘이 그 구동방식에 따라 유압식(Hydraulic)과 전기 Motor방식으로 구분된다. 유압식에서는 토크전달을 Lever로 전달하는 방식을 쓰고 전기 Motor방식에서는 기어로 전달하는 방식을 쓰고 있으므로 그 메카니즘이 근본적으로 다르다. 본 논문에서는 전기 Motor방식으로 사용함을 전제로 단상 유도기를 사용하여 날개를 제어하였다. 그리고 제어방식은 PLC를 사용하므로 각각의 풍속에 따른 피치제어를 할 수 있게 하였다.

## 2.3 피치제어 시스템과 시뮬레이션

### 2.3.1 피치제어 시스템

풍속에 대한 발전기의 부담을 줄여주기 위하여 피치각을 알아내는 것은 날개의 형상에 의한 특성을 알아야 한다. 형상에 의해 주어지는 주속비와 출력계수의 관계는 이를 밝히는 데 중요한 자료가 되어진다.

풍속, 날개회전속도, 발전기의 출력은 항상 변하고 이에 따른 주속비와 출력계수 역시 변화되어진다. 풍속, 날개회전속도, 그리고 발전기출력은 측정되어지며, 주어진 값으로부터 정격출력 이하에서는 최고효율의 출력을 낼 수 있는 출력계수를 유지하도록 피치각을 제어하여 주고, 정격출력 이상에서는 최고출력을 낼 수 있도록 출력계수를 유지한다는 것은 발전기의 부담을 과중시키는 결과가 되어 발전기는 과부하 상태에 놓이게 된다. 이를

방지하고 발전기의 기계적 부하를 제한하기 위하여 출력계수를 낮추어 발전기를 정격에서 동작하도록 해야 하는데, 출력계수를 낮추어 주는 방법은 날개의 피치각을 제어하여 주는 것이다. 피치각을 조절하면, 바람으로부터 날개가 받는 회전력을 감소시킬 수 있으므로 출력계수가 감소하는 작용을 하여 발전기는 정격에서 동작할 수 있도록 한다. 초기 측정치와 측정치에 따른 변화값들은 매 순간 바뀌므로, 이러한 값들을 추종하는 것은 피칭부분에 기계적인 부하를 가중시키는 결과를 가져온다. 이러한 부하를 줄여 주기 위하여 측정치는 일정시간동안의 변화값들에 대한 평균값으로 사용한다.

위에서 언급한 알고리즘을 구현 시스템을 제작하여 실제 풍력발전의 동작을 시뮬레이션하여 주요기능을 갖추어 모델링 하였다. 피치제어를 위한 외부 입력 풍속, 로터속도, 풍향 등은 가상적으로 만들어 주었다.

구현 시스템은 2대의 PLC로 구성되어 있다. 1대의 PLC는 임의의 상황을 가상하여 풍속, 풍향, 외부조건, 비상상황 등을 정하여 주는 용도로 사용하였고, 나머지 하나는 이를 토대로 풍력발전기제어를 위한 피칭, 요잉, 시스템 상태표시, 비상상황 대응 등을 할 수 있도록 구현하였다. 그림 6은 피치제어 알고리즘을 적용하기 위하여 사용되어진 PLC모듈과 기능구현을 위하여 사용되어진 장치를 나타내며 가상부하용 PLC와 시뮬레이터용 PLC의 입출력의 연결상태를 보여주고 있다.

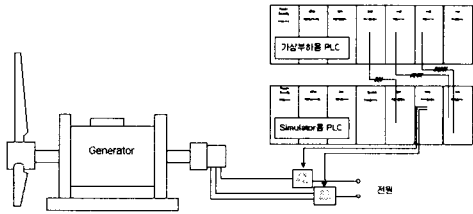


그림 6. 풍력발전 피치제어 시스템의 구성도

### 2.3.2 시뮬레이션

앞에서 언급한 수식과 알고리즘으로 프로그램을 하여 직접 시뮬레이션 하였다. 먼저 풍속을 Random하게 주었을 경우 피치제어의 유무에 따른 날개의 회전력과 회전토크를 시뮬레이션 하였다. 이 때 시뮬레이션한 날개의 재원과 형상은 다음과 같다.

표 1. 적용한 날개의 재원

Blade section	NACA 65-2
Blade length	21 m
Root chord length	2.25 m
Tip chord length	0.899 m
Twist angle	12°
Taper ratio	0.4
Rated wind speed	13 m/s

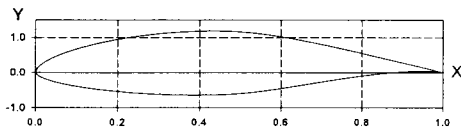


그림 7. NACA 65-2 모델의 날개형상

피치제어 유무에 따른 풍속과 회전토크의 관계는 그림 8와 같다.

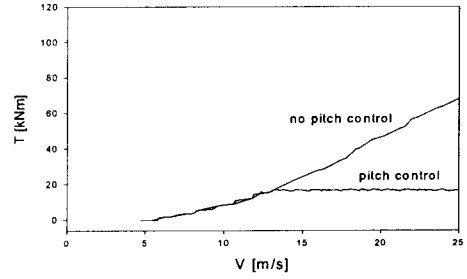


그림 8. 피치제어 유무에 따른 풍속 대 회전토크

날개의 피치제어를 통하여 정격속도 이하에서는 피치제어가 일어나지 않으므로 피치제어를 하지 않은 경우와 거의 비슷하게 나타나다가 정격풍속 13 m/s에서부터 피치제어가 시작되면서 회전토크가 거의 일정하게 되었다. 따라서 발전기의 Rotor회전속도를 일정하게 할 수 있다.

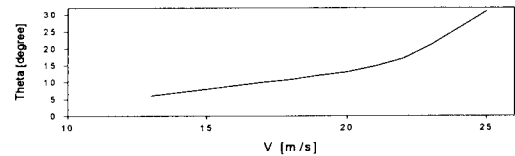


그림 9. NACA 65-2 날개의 풍속 대 피치각

본 논문에 사용된 날개의 정력출력을 내기 위한 풍속에 따른 적절한 피치각을 그림 9에 나타내었다. 풍속이 약 13m/s 이상이 되면 피치제어가 시작되다가 25m/s의 풍속이상이 되면 피치제어를 멈추고 Feathering(정지)상태가 된다. 따라서 어떠한 날개의 형상이라도 그에 따른 양력계수와 항력계수를 알고 있다면 그 날개의 풍속에 따른 피치각을 찾아 낼 수 있다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 풍력발전 시스템에서 피치제어가 시스템의 출력에 미치는 영향을 예측하기 위하여 시스템을 구성하고 있는 각 구성요소별 모델을 기초로 하여 전체 시스템의 모델을 유도하였다. 풍력발전시스템에서 발전기의 피치제어에 의한 출력특성을 해석하기 위하여 NACA 65-2의 날개형상과 발전기를 모델로 선정하여 풍속과 날개의 회전속도 등 외부조건과 풍력발전기의 관계를 찾아내었다. 이들 외부조건에 따른 발전기의 출력과 토크특성 변화를 시뮬레이션하였으며 특히 Twist되어 있는 날개의 회전모멘트와 회전토크의 특성을 수식으로 유도하고 시뮬레이션 하였다. 또한 날개의 정격출력을 내기 위한 피치각을 찾아 내어 실제 풍력발전시스템의 설계 시 그 토대를 마련할 수 있도록 하였다. 또한 풍력발전 피치제어 시스템의 알고리즘을 적용할 수 있는 시스템을 PLC를 이용하여 구성하였다.

### (참 고 문 헌)

- [1] 오철수, 서영택, "다변풍속 적응형 Darrieus-Savonius 조합 수직축 풍력 발전 시스템의 설계," 대한전기학회 논문집 제45권 제 2호, pp.185~192, 1996
- [2] V Middleton, P Fitches, G Jeronimidis and Feuchtwang, "Passive Blade Pitching for overspeed control of an HAWT," Proceedings of 1998 BWEA annual conference, 1998, pp.103~118.