

## 피치각을 고려한 풍력발전기 출력특성 시뮬레이션 모델의 응용

송승호                      정병창  
 광운대학교              LS산전

### Simulation of Output Power Variation in Wind Energy Conversion System due to Pitch Angle Change

Seung-Ho Song                      Byung-Chang Jeong  
 Kwangwoon University              LS Industrial Systems

#### ABSTRACT

본 논문에서는 블레이드 피치각 변동을 포함한 풍력발전기 출력특성 시뮬레이션 모델을 개발하였으며, 피치각 변동이 필요한 경우를 각각 비상정지, 기동원활, 출력제한의 3가지 사례 연구를 통해 개발된 모델의 검증 수행하였다. 비상정지의 상황에서 풍력발전기의 출력특성을 모의하였고, 초기 정지 상태에서 블레이드 기동을 위한 초기 피치각 설정 및 변동하는 회전 속도에 맞는 블레이드 변동 지령 값을 구현하였으며, 정격 풍속 이상에서 피치각을 감소시키는 제어를 구현하여 정격 이상의 출력 발생이 제한되는 것을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

#### 1. 서 론

풍력에너지는 부존량이 무한한 재생가능한 에너지원이나 에너지 밀도가 낮고 출력이 기상조건에 의해 시간에 따라 변화하며 전력생산 원가가 높다는 단점이 있었다. 이러한 점을 극복하기 위하여 최근에는 풍력발전기 단위용량이 대형화되고 여러대의 풍력발전기를 설치한 대규모 풍력단지가 건설되고 있다. 블레이드가 받는 바람의 면적을 증가시키기 위해 블레이드 직경이 100m을 넘는 수 MW급 용량의 초대형 풍력발전기를 제조회사마다 출시하고 있으며, 대량생산 및 운영을 통한 원가절감을 위해 풍력단지(Wind Farm)를 조성하는 추세에 있다.

최근 대부분의 대형 풍력발전기는 출력 제어방식으로 바람의 풍속 변화에 효율적인 운전이 가능하고 비상시 대비 능력이 우수한 점을 고려하여 피치각 제어 방식을 채택하고 있다.

피치각 제어방식은 운전 중에 블레이드의 각도를 회전시켜 필요에 따라 출력을 조정 할 수 있고, 이상 풍속 및 전력계통의 사고 시 위험한 속도까지 상승하지 못하도록 하거나 비상정지가 가능하여야 한다. 따라서 전체 풍력발전 시스템과 구조물의 안전을 위하여 정격보다 높은 풍속이나 비상 정지등의 상황에서 시스템이 어떻게 안전하게 동작할 것인지 사전에 검토하기 위해서 블레이드 피치각 변화까지 고려된 풍력발전기 시뮬레이션 모델의 개발이 필요하다.[1]

이러한 특성을 고려하기 위해 기존의 많은 연구에서 블레이드 출력 특성을 주속비에 관한 함수로 모델링하고 해석하였다.[1],[2] 즉 회전속도와 풍속의 비율에 따라 결정되는 주속비가 회전자 블레이드에 가해지는 바람의 상대 속도를 결정하므로 블레이드의 출력특성이 최대점을 중심으로 단조감소 곡선의

형태를 보인다.

그러나, 실제로 이러한 조건은 피치각이 일정한 경우에만 만족되고 블레이드의 피치각이 변동하면 블레이드의 공기역학적 특성 변화로 인해 출력특성이 크게 달라진다. 이러한 특성 변화는 개별 블레이드마다 차이가 있으나 이를 수학적으로 모델링한 결과가 제시되었다.[3],[5],[7] 참고문헌[3]에서는 정격 이상의 고풍속 영역에서 발전기 토크 기술기에 따른 출력제한 특성을 시뮬레이션하고 있으나 피치각 변동이 블레이드 특성변화를 어떻게 구현했는지 명확히 설명되지 않았다.

본 논문에서는 풍속변동이나 회전속도 변화뿐 만아니라 피치각 변동 시에 대해서도 풍력발전기 출력특성을 시뮬레이션 할 수 있도록 하기 위하여 블레이드 출력계수를 주속비 및 피치각에 따른 2차원 함수로 구현하였다. 또한 실제 풍력발전 시스템의 운전시 피치각을 변동시키는 상황을 크게 3가지 경우로 구분하여 비상정지, 기동원활, 출력제한에 대한 각각의 상황이 어떤 경우에 나타나는지 설명하였고 그 상황에 알맞은 시뮬레이션을 수행하였다.

#### 2. 피치제어 방식의 풍력발전 시스템 모델링

##### 2.1 블레이드 모델링

풍력발전 시스템에 입력되는 에너지는 블레이드에서 변환된 기계적 에너지  $P_{blade}$ 로 식(1)과 같다.[1][3]

$$P_{blade} = \frac{1}{2} A \rho V_{wind}^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

여기서  $C_p(\lambda, \beta)$ 는 블레이드의 출력계수로 블레이드의 피치각  $\beta$ 와 주속비  $\lambda$ 의 함수로 다음과 같이 표현되며 그림 1과 같다.[3]

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left( c_2 \frac{1}{\lambda} - c_3 \beta - c_4 \beta^x - c_5 \right) e^{-c_6 \frac{1}{\lambda}} \quad (2)$$

여기서  $C_1 \sim C_6$ ,  $x$ 는 블레이드 형상에 따른 상수이며 변수  $\frac{1}{\lambda}$ 는 아래와 같이 정의한다.  $\beta$ 는 블레이드 피치각으로 [deg]단위로 표시한다.

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \quad (3)$$

본 논문에서는 다양한 풍력 발전기별  $C_1 \sim C_6$ ,  $x$ 의 상수에 따라서 각각 다르게 근사화된  $C_p(\lambda, \beta)$  특성곡선의 모양 차이가 크지 않고, 중요한 변수는 피치각과 주속비의 변화이므로

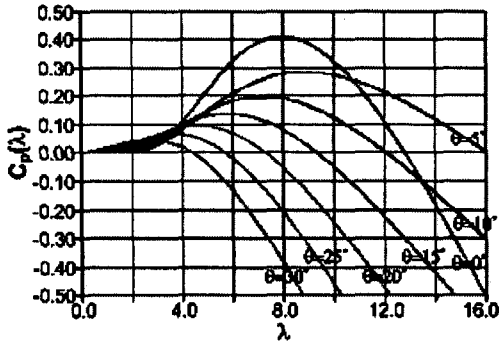


그림 1 주속비와 피치각 변동을 함께 고려한 풍력발전기 출력 계수 곡선  
Fig. 1 Power coefficient curve with pitch angle and tip speed ratio

로 시뮬레이션 모델링에서는 아래 상수를 적용하였다.

$$C_1 = 0.5 \quad C_2 = 116 \quad C_3 = 0.4$$

$$C_4 = 0 \quad C_5 = 5 \quad C_6 = 21$$

$$x = 0$$

이 값들은 참고문헌 [3],[5]에서 사용하고 있는 값과 같다.

## 2.2 피치제어기 구현

본 논문에서는 피치각의 변동으로 블레이드 공기역학적 출력 토크가 변화하는 것을 출력계수  $C_p$ 값에 반영하여 출력특성이 변화하도록 시뮬레이션모델을 구성하였다. 그림 2는 피치각을 고려한 풍력발전기 출력 제어 모델로서 피치각 구동기 모델, 피치각을 포함한 블레이드 모델, 회전체 동력학 모델, 발전기 및 전력제어부 모델을 포함하고 있다. 피치각 구동기의 모델링 내부에는 피치각 지령값 기울기 제한(reference ramp limit) 기능과 1차지연(first order delay) 응답특성을 포함하고 있다. 공기역학적 회전자 모델은 주속비와 함께 피치각의 변화까지 고려하여 블레이드에서 입력되는 토크를 계산하도록 구성하였다. 발전기 및 전력제어부 블록에서는 발전기 토크 기준값은 식 (4)와 같이 발전기 회전속도의 제곱에 비례하여 증가시키도록 함으로써 입력 풍속의 변동에 따라 자동으로 최대 출력을 발생하는 회전속도에서 운전되도록 하였다.

$$T_g^* = K_{opt} \omega^2 \quad (4)$$

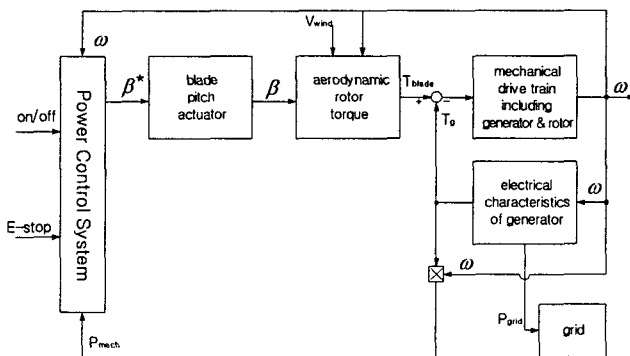


그림 2 피치각 변동을 고려한 풍력발전기 출력 제어  
Fig. 2 Wind turbine power control with variable pitch angle

## 3. 피치각 변동을 고려한 시뮬레이션

### 3.1 비상정지

첫 번째 사례는 운전 중 비상정지이다. 주변에 갑작스러운 위험이 발생하거나 안전을 위해 필요한 경우 운전 중인 시스템을 비상정지 시킬 필요가 있다. 이때 출력제어 시스템은 즉각 피치각 지령 값을  $\beta^* = 90^\circ$  로 변경하고 최대한 빠르게 시스템을 정지하여야 한다. 이러한 상황을 비상정지라고 하며 이때 발전기나 계통 연계 회로에 과속도, 과전압, 과전류 등의 문제가 발생하지 않아야 한다. 그림 3은 정격 출력(750kW)로 운전중 갑자기 계통측으로 나가는 출력이 영이 되었을 때 발전기 회전속도가 증가하지만 피치각 제어에 의해 출력이 영으로 감소하는 과도상태 특성을 보이고 있다.

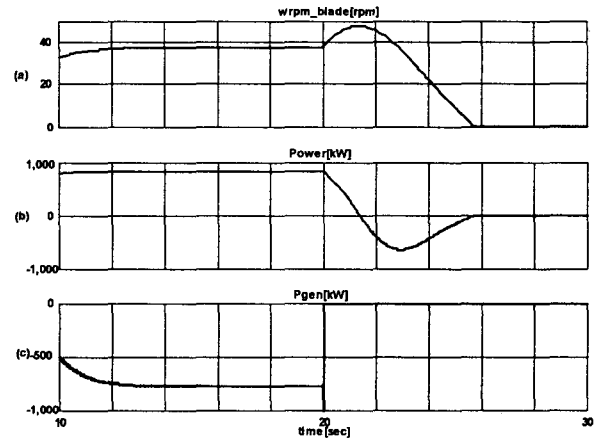


그림 3 정격 풍속(12[m/sec])상태에서 비상정지시 풍력발전기 운전 특성 (a) 블레이드 회전속도  $\omega_{rpm}$  (b) 블레이드의 기계적인 출력  $P_{blade}$  (c) 발전기 출력  $P_g$

Fig.3 Simulation waveform for wind generator characteristics of e-stop in wind rate speed (12[m/sec])

(a) blade rotation speed  $\omega_{rpm}$  (b) blade power  $P_{blade}$  (c) generator power  $P_g$

### 3.2 초기기동 원할

풍력발전 시스템이 정지상태에서 바람이 불어올 때 회전속도를 빠르게 증가시키기 위하여 피치를 제어한다. 그림 4는 낮은 주속비에서 피치각에 따른 출력계수이다. 정지상태일 경우 블레이드의 피치를  $45^\circ$ 로 제어하고 주속비가 증가함에 따라서 피치각을  $35^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $15^\circ$  그리고 최종적으로는  $0^\circ$ 로 제어하면 출력계수가 최대값에서 운전되게 되어 기동시간이 짧아지는 효과가 있다.

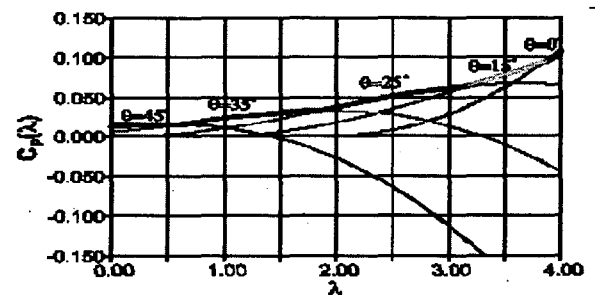


그림 4 저속 운전 영역에서의 출력 계수 곡선  
Fig. 4 Power coefficient curve at low Tip Speed Ratio

즉 정상 상태 최대 출력발생 운전 조건인  $\beta^*=0^\circ$  으로 설정하기보다는 처음 바람이 불기 시작해서 블레이드가 회전하기 시작할 때 그림 4와 같이  $\beta^*=45^\circ$  로 초기값을 설정 했을 때 기동이 원활하다.

### 3.3 출력제한

정격풍속 이상의 바람이 불면 발전시스템의 보호를 위해 블레이드 피치각을 제어함으로써 입력되는 전력(Power)을 제한할 필요가 있다. 블레이드 피치각을 변화시켜 토크를 조절함으로써 바람의 변화에 따라 발생하는 출력을 정격으로 제한 또는 유지하도록 피치각 제어를 설계하는 것이 일반적이다.

그림 5는 정격풍속 12[m/sec]에서 운전중 갑자기 풍속이 15[m/sec]로 증가할 때 풍력발전기의 출력특성을 관찰한 것이다. 그림 5 (a)는 14초에서 22초구간에서 8초간 풍속이 12[m/sec]에서 15[m/sec]로 갑자기 증가했다가 다시 정격풍속으로 감소하는 풍속 파형이다. (b)는 블레이드 회전속도로 과도상태 구간에서 증가했다가 피치제어의 동작에 의해 다시 정격 회전속도로 안정화되는 것을 보여주고 있다. 반대로 풍속이 갑자기 감소하면 일정시간동안 회전속도가 감소되었다가 다시 증가하여 안정화되는 파형을 보여준다. (c)는 블레이드 피치각으로서 초기값  $0^\circ$ 에서 출발하여 과풍속 구간에서는 출력 제한을 위해 피치를 제어하다가 입력풍속이 감소하면 다시 피치각을  $0^\circ$ 로 유지함을 보여준다. (d)는 출력계수를 나타낸 것으로 바람이 가진 에너지중에서 얼마나 풍력발전기가 에너지 변화하고 있는 지를 나타낸다. 정격이상의 풍속에서 출력계수가 감소되었다가 다시 정격풍속으로 돌아오면 최대 출력계수를 발생하고 있다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 블레이드 피치각 변동을 포함한 풍력발전기

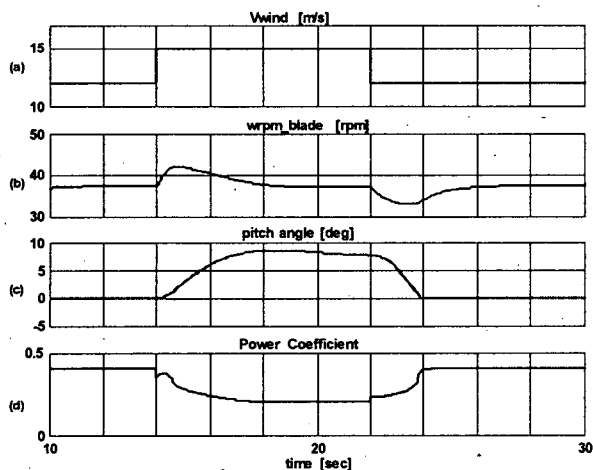


그림 5 정격풍속 이상(12 → 15 → 12[m/sec])에서 블레이드 출력 제한 특성

- (a) 풍속  $V_{wind}$  (b) 블레이드 회전속도  $\omega_{rpm}$   
 (c) 블레이드 피치각  $\beta$  (d) 출력계수  $C_p(\lambda, \beta)$

Fig. 5 Output power and other variables when the wind speed step change (12 → 15 → 12[m/sec])

- (a) wind speed  $V_{wind}$  (b) blade rotation speed  $\omega_{rpm}$   
 (c) blade pitch angle  $\beta$  (d) power coefficient  $C_p(\lambda, \beta)$

출력특성 시뮬레이션 모델 개발하였으며, 피치각 변동이 필요한 경우를 각각 비상정지, 기동원활, 출력제한의 3가지 사례연구를 통해 개발된 모델의 검증 수행하였다.

비상정지의 상황에서 풍력발전기의 출력특성을 모의하였고, 초기 정지 상태에서 블레이드 기동을 위한 초기 피치각 설정 및 변동하는 회전속도에 맞는 블레이드 지령값을 구현하였으며, 정격 풍속이상에서 정격이상의 출력 발생을 제한하기 위하여 피치각을 감소시키는 제어를 구현하여 실제 상황과 가까운 풍속입력 패턴으로 이를 시뮬레이션 과정을 통하여 확인하였다.

이 논문은 기초전력연구원의 "신재생에너지 발전의 계통 연계 기초기술 개발" 과제(과제번호 R-2004-B-125)의 지원으로 수행되었음

## 참 고 문 헌

- [1] Erich Hau, "Windturbines", Springer, pp.314, 2000.
- [2] 정병창, 정세종, 송승호, "가변관성 모의 기능을 가진 풍력 터빈 시뮬레이터의 제어 알고리즘," 전력전자학회 논문지, Vol. 8, No. 3, pp. 266-273, 2003.
- [3] Z. Lubosny, "Wind Turbine Operation in Electric Power Systems", Springer, pp.73-82, 202-205, 2003.
- [4] R. Gasch, J. Twele, "Wind Power Plants", Solarpraxis AG, pp.342-345, 2002.
- [5] S Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", John Wiley & Sons, pp.17-36, 1996
- [6] N. Horiuchi, T. Kawahito, "Torque and Power Limitations of Variable Speed Wind Turbines Using Pitch Control and Generator power Control", Power Engineering Society General Meeting, 2001, IEEE, Vol. 1, pp.638-643, Jul 2001.
- [7] J. G. Slootweg, S. W. H. de Haan, H. Polinder, W. L. Kling, "General Model for Representing Variable Speed Wind Turbines in Power System Dynamics Simulations", IEEE Transaction on Power Systems, Vol.18, No. 1, pp.144-151, Feb 2003.
- [8] E. Muljadi, C. P. Butterfield, "Pitch-Controlled Variable-Speed Wind Turbine Generation", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 37, No. 1, pp.240-246, Jan/Feb 2001.