

# 풍력 터빈 시스템의 강인 피치 제어

## A Robust Pitch Control of Wind Turbine Systems

한명철<sup>1,✉</sup>, 성창민<sup>2</sup>, 황욱<sup>2</sup>

Myung-Chul Han<sup>1,✉</sup>, Chang-Min Sung<sup>2</sup>, and Wook Hwang<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 부산대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Pusan Nat. Univ.)

<sup>2</sup> 부산대학교 대학원 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Pusan Nat. Univ.)

✉ Corresponding author: mchan@pusan.ac.kr, Tel: +82-51-510-2459

Manuscript received: 2013.09.30 / Accepted: 2013.11.21

*In this paper, we consider variable speed wind turbine systems containing uncertain elements. Though PI controller is generally used for pitch control, it cannot guarantee a stability and performance of the complicated wind turbine systems. A robust pitch control scheme is proposed to regulate the electric power output above the rated wind speed. The pitch controller is designed in order to guarantee uniform boundedness and uniform ultimate boundedness based on the bound values of the set where the uncertainties are laid or moves. In order to verify the proposed control scheme, we present stability analysis and simulation results using Matlab/Simulink.*

Key Words: Wind Turbine System (풍력 터빈 시스템), Pitch Control (피치제어), Robust Control (강인제어), Uncertainty (불확실성), Lyapunov Stability (리아프노프 안정성)

### 1. 서론

이상기온과 산업화가 거듭될수록 전기사용량이 많아지며 이에 따른 전력 공급이 매년 어려워지고 있다. 국내 에너지 수입액은 2011년 약1,558억 달러이며, 전년 1,217억 달러보다 무려 28% 증가했고 현재까지 계속 증가하고 있다. 세계 9위의 에너지 소비국가로 급부상한 우리나라는 에너지 생산에 충력을 기울이고 있으며, 그린에너지와 같은 위험성이 적은 에너지 산업 분야의 육성에 중점을 두고 있다. 특히, 바람을 이용한 풍력산업은 90년대 중반부터 본격적으로 기술이 개발되기 시작하면서, 현재까지 활발한 연구가 이어지고 있다.

풍력 터빈의 제어는 정격 풍속을 기준으로 그 이전과 이후에서 각각 시행된다. 정격 풍속 이전 구간에서는 바람이 갖는 에너지를 최대한 회수하여 효율을 극대화시켜야 하며, 이를 위해 발전기

부에서 토크 제어가 이루어진다.<sup>1</sup> 정격 풍속 이후 구간에서는 바람에 의한 에너지 회수율을 떨어뜨려 정격 출력을 유지시키며, 블레이드의 피치각 제어를 통해 이를 구현한다.

피치각 제어는 일반적으로 PI 제어기를 사용하여 이루어지는데,<sup>2</sup> PI 제어기는 랜덤 풍속 조건과 같은 비선형 및 불확실한 요소들에 대한 수행능력이 제한된다.<sup>3</sup> 실제적으로 풍력 터빈 시스템의 동역학에는 불확실한 매개변수들, 즉, 마찰력, 비선형적인 풍속, 외란 등 여러 종류의 인자들이 포함된다.

본 논문에서는 풍력 터빈 시스템이 가질 수 있는 불확실한 인자들을 고려하여, 보다 실용적인 강인 피치 제어기를 설계하여 제시한다. 이를 위해 2장에서는 발전기 및 피치 액추에이터를 포함한 풍력 터빈 시스템의 전반적인 모델링이 이루어진다. 이를 바탕으로 3장에서는 토크 제어시스템

과 불확실성을 고려한 비선형 피치제어 시스템을 제안하고, 리아프노프 함수를 이용해 시스템의 안정성을 평가한다. 그리고 4장에서는 시뮬레이션을 통해 이를 검증한다.

## 2. 풍력 터빈 시스템 모델링

풍력터빈에 의해 회수될 수 있는 전력은 식(1)과 같다.

$$P_w = \frac{1}{2} \rho_a \pi R^2 C_p v^3 \quad (1)$$

여기서,  $\rho_a$ 는 공기 밀도,  $R$ 은 블레이드의 반지름,  $C_p$ 는 출력파워계수,  $v$ 는 풍속이다.

본 연구에서 사용한 출력파워계수  $C_p$ 는 다음과 같으며,<sup>4</sup> 피치각  $\beta$ 와 주속비  $\lambda$ 에 따른  $C_p$ 의 변화는 Fig. 1과 같이 나타난다.

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

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + 0.08 \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v}$$

여기서,  $c_1 \sim c_6$ ,  $x$ 는 풍력터빈에 의해 결정되는 계수,  $\omega_r$ 은 블레이드의 회전속도이다.

블레이드에서부터 발전기까지의 모델링 식을 정리하여, 발전기 회전축에 대해 나타내면 다음과 같다.

$$J \dot{\omega}_g = \frac{1}{N} T_w - T_g - f_c \quad (3)$$

$$= \frac{1}{N} T_w - T_g - B_f \omega_g$$

여기서,  $J$ 는 블레이드 및 발전기 축에 등가된 회전관성질량,  $\omega_g$ 는 발전기 축의 회전속도,  $N$ 은 기어비,  $T_w$ 는 공력토크,  $T_g$ 는 발전기에 작용하는 반력토크,  $f_c$ 는 마찰 회전력,  $B_f$ 는 댐핑 계수이다.

공력토크  $T_w$ 는 식(1)을 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_w = \frac{P_w}{\omega_r} = \frac{1}{2\lambda} \rho_a \pi R^3 v^2 C_p \quad (4)$$

또한,  $\omega_r$ ,  $\omega_g$ , 전기적 회전속도  $\omega_e$ , 사이에는

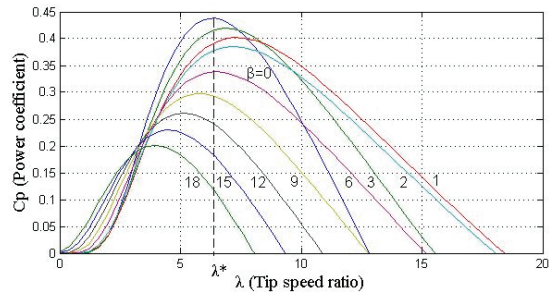


Fig. 1 Wind turbine power coefficient

다음의 관계식이 성립한다.

$$\omega_r = \frac{1}{N} \omega_g = \frac{1}{2pN} \omega_e \quad (5)$$

여기서,  $p$ 는 발전기의 극의 개수이다.

본 연구에서 사용된 발전기는 영구 자석형 동기발전기로,<sup>5</sup> 영구 자석의 회전에 의해 각 상으로 전압이 유도되며, 유도되는 전압  $e_a$ ,  $e_b$ ,  $e_c$ 는 다음과 같이 나타난다.

$$e_a = -\frac{d\lambda_m}{dt} = \phi \omega_e \sin \omega_e t$$

$$e_b = \phi \omega_e \sin(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}) \quad (6)$$

$$e_c = \phi \omega_e \sin(\omega_e t + \frac{2\pi}{3})$$

여기서,  $\phi$ 는 영구 자석의 자속,  $\lambda_m$ 은  $\lambda_m = \phi \cos \omega_e t$ 로 나타낼 수 있는 영구자석 회전에 의한 자속의 변화이다.

이때, 고정자 권선에 대한 전압방정식은 아래와 같이 나타난다.

$$v_a = -R_s i_a - \frac{d\lambda_a}{dt} + e_a$$

$$v_b = -R_s i_b - \frac{d\lambda_b}{dt} + e_b \quad (7)$$

$$v_c = -R_s i_c - \frac{d\lambda_c}{dt} + e_c$$

여기서,  $v_a, v_b, v_c$ 는 고정자 각 상의 전압,  $i_a, i_b, i_c$ 는 고정자 각 상에 흐르는 전류,  $R_s$ 는 고정자 저항,  $\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c$ 는 고정자 각 상의 인덕턴스이다.

이제 3상 교류회로 해석을 위해 식(8)과 같이 dq변환을 하며, dq변환된 발전기 전압의 모델 및 반력 토크의 모델은 식(9), (10), (11)과 같다.<sup>6</sup>

$$u_{dq} = T_{\theta} v_{abc} \quad (8)$$

$$u_d = R_s i_d + \frac{d}{dt} Li_d - \omega_e Li_q \quad (9)$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d}{dt} Li_q + \omega_e (Li_d + \phi) \quad (10)$$

$$T_g = \frac{3}{4} p \phi i_q \quad (11)$$

여기서,  $T_{\theta}$  는 dq변환행렬,  $u_d, u_q$  는 dq축 전압,  $i_d, i_q$  는 dq축 전류,  $L$  은 인덕턴스이다.

피치각을 조절하는 액추에이터는 전기모터로 구현될 수 있으며, 동적 특성은 다음과 같은 1차 전달함수로 근사화될 수 있다.<sup>7</sup>

$$\frac{\beta}{u_{\beta}} = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (12)$$

여기서,  $u_{\beta}$  는 피치각 명령 신호,  $\tau$  는 피치 액추에이터의 시정수이다.

### 3. 제어시스템 설계

풍력터빈의 제어시스템은 정격풍속을 기준으로 토크 제어부와 피치 제어부로 나누어진다. 따라서 각각에 해당되는 제어 시스템을 따로 설계하여 해당되는 풍속에서 실행되어야 한다.

#### 3.1 토크제어 시스템

토크 제어부에서는  $C_p$  가 최댓값이 되도록 제어하여 출력 전력이 최대가 되게 한다. 식(1), (2), Fig. 1을 함께 살펴보면,  $C_p$  가 최댓값을 가질 때, 최대전력이 생산되며, 이는  $\beta = 0$ , 그리고  $\lambda = \lambda^*$  가 되도록 풍속에 따른 블레이드의 회전속도를 제어할 때 가능하다.

결국, 블레이드 회전속도는 발전기 토크제어에 의해서 이루어지며 식(11)의  $i_q$  를 통해 발전기축 토크 제어가 가능하다. 발전기 토크의 목표치  $T_g^*$  는 정격이하의 각 풍속에서 최대 출력토크이며, 이를 나타내면 다음과 같다.

$$T_g^* = \frac{T_w}{N} - B_f \omega_g \quad (13)$$

$$= \frac{\rho_a \pi R^3 C_{pmax}}{2N\lambda^*} v^2 - \frac{NB_f \lambda^*}{R} v$$

따라서,  $i_q$  의 목표치  $i_q^*$  는 식(11), (13)에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_q^* = \frac{4}{3p\phi} \left( \frac{\rho_a \pi R^3 C_{pmax}}{2N\lambda^*} v^2 - \frac{NB_f \lambda^*}{R} v \right) \quad (14)$$

그러면, 입력 전압  $u_q$  는 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$u_q = R i_q^* \quad (15)$$

#### 3.2 피치제어 시스템

피치제어는, 풍속에 따른 블레이드의 피치각을 제어하여 블레이드의 회전을 정격속도로 일정하게 회전시켜서 정격출력을 유지하도록 하는 역할을 한다.

정격풍속 이전구간의 토크제어가 잘 수행 되었을 때, 반력토크  $T_g$  는 식(13)에 의해 다음과 같이 나타난다.

$$T_g = \frac{\rho_a \pi R^3 C_{pmax}}{2N^3 \lambda^{*3}} \omega_g^2 - \frac{NB_f \lambda^*}{R} v$$

$$= \frac{K_1^*}{N} \omega_g^2 - \frac{K_2^*}{N} v \quad (16)$$

$$K_1^* = \frac{\rho_a \pi R^3 C_{pmax}}{2N^2 \lambda^{*3}}$$

$$K_2^* = \frac{N^2 B_f \lambda^*}{R}$$

여기서,  $K_1^*, K_2^*$  는 주어진 풍속에서 발전기가 최대 출력을 나타낼 때의 상수값이다.

식(12)의 피치각 전달함수는 다음과 같이 변형하여 나타낸다.

$$\dot{\beta} = \frac{1}{\tau} (u_{\beta} - \beta) \quad (17)$$

그리고, 다음과 같이 상태공간 모델링을 위한 상태변수를 설정하고 식(3), (16)을 이용해 설정한 상태변수에 대해서 나타낸다.

$$x_1 = \omega_g - \omega_g^* \quad (18)$$

$$x_2 = \dot{\omega}_g = \frac{1}{JN} (T_w - K_1^* \omega_g^2 + K_2^* v) - \frac{1}{J} f_c$$

여기서,  $\omega_g^*$  는 발전기 축의 정격회전속도이다. 그러면 다음과 같이 시스템이 정리된다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{JN} \left\{ \left( \frac{3K_3 v^2 C_p}{x_1 + \omega_g^*} + K_2^* \right) \dot{v} + \frac{K_3 v^3 x_2}{x_1 + \omega_g^*} \frac{\partial C_p}{\partial \omega_g} \right. \\ &\quad - \frac{K_3 v^3 \beta}{\tau(x_1 + \omega_g^*)} \frac{\partial C_p}{\partial \beta} + \frac{K_3 v^3}{x_1 + \omega_g^*} \frac{\partial C_p}{\partial v} \dot{v} \\ &\quad \left. - \frac{K_3 v^3 C_p x_2}{(x_1 + \omega_g^*)^2} - 2K_1^* (x_1 + \omega_g^*) x_2 \right\} \\ &\quad - \frac{\dot{f}_c}{J} + \frac{K_3 v^3}{JN\tau(x_1 + \omega_g^*)} \frac{\partial C_p}{\partial \beta} u_\beta \end{aligned} \quad (19)$$

여기서,  $K_3 = \frac{\rho_a \pi N R^2}{2}$  이다.

결국 식(19)는 다음의 식(20)과 같은 형태이며, 마찰 회전력  $f_c$  와 풍속  $v$  의 불확실한 인자로 인해 함수  $f_1, f_2$  에 불확실성이 내포되어 있다.

$$\ddot{\omega}_g = f_1(\omega_g, \dot{\omega}_g, \beta, v, \dot{f}_c) + f_2(\omega_g, \beta, v) u_\beta \quad (20)$$

여기서,

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{1}{JN} \left\{ \left( \frac{3K_3 v^2 C_p}{x_1 + \omega_g^*} + K_2^* \right) \dot{v} + \frac{K_3 v^3 x_2}{x_1 + \omega_g^*} \frac{\partial C_p}{\partial \omega_g} \right. \\ &\quad - \frac{K_3 v^3 \beta}{\tau(x_1 + \omega_g^*)} \frac{\partial C_p}{\partial \beta} + \frac{K_3 v^3}{x_1 + \omega_g^*} \frac{\partial C_p}{\partial v} \dot{v} \\ &\quad \left. - \frac{K_3 v^3 C_p x_2}{(x_1 + \omega_g^*)^2} - 2K_1^* (x_1 + \omega_g^*) x_2 \right\} - \frac{\dot{f}_c}{J}, \\ f_2 &= \frac{K_3 v^3}{JN\tau(x_1 + \omega_g^*)} \frac{\partial C_p}{\partial \beta} \end{aligned}$$

이다.

식(19)를 다시 다음과 같이 정리한다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -b_1 x_1 - b_2 x_2 + \hat{f}_2 (1 + \alpha_1) u_\beta + f_1 + b_1 x_1 + b_2 x_2 \\ &= -b_1 x_1 - b_2 x_2 + \hat{f}_2 (1 + \alpha_1) u_\beta + g_1 \end{aligned} \quad (21)$$

여기서,  $b_1 > 0, b_2 > 0$  이며,  $\hat{f}_2$  는  $\hat{f}_2 = \frac{f_2 + \bar{f}_2}{2}$  로 정의되는  $f_2$  의 추정값,  $\underline{f}_2, \bar{f}_2$  는  $\underline{f}_2 \leq f_2 \leq \bar{f}_2$  로 정의되는  $f_2$  의 한계값,  $g_1 = f_1 + b_1 x_1 + b_2 x_2$  이다.

$f_2$  의 불확실한 양을  $\Delta f_2$  라 할 때,  $f_2$  는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_2 = \hat{f}_2 + \Delta f_2 \quad (22)$$

그러면, 식(21)의  $\alpha_1$  은 다음과 같이 표현된다.

$$\alpha_1 = \frac{\Delta f_2}{\hat{f}_2} \quad (23)$$

이 때, 식(23)의 최대값을 다음과 같이 가정한다.

$$\begin{aligned} \max \left\{ \frac{\Delta f_2}{\hat{f}_2} \right\} &< 1 \\ \therefore |\alpha_1| &< 1 \end{aligned} \quad (24)$$

이제, 상태변수 벡터  $X$  를 다음과 같이 두고,

$$X = [x_1, x_2]^T$$

식(21)을 다시 다음과 같이 정리한다.

$$\dot{X} = AX + Bu_\beta + \alpha_1 Bu_\beta + \gamma B \quad (25)$$

여기서,  $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -b_1 & -b_2 \end{bmatrix}$ ,  $B = \begin{bmatrix} 0 \\ \hat{f}_2 \end{bmatrix}$ ,  $\gamma = \frac{g_1}{\hat{f}_2}$  이다.

그리고 본 풍력 피치 제어시스템에 대하여 제안하는 강인제어기는 다음과 같다.

$$u_\beta = \begin{cases} \frac{-B^T P X \rho}{\|B^T P X \rho\|} \rho & \text{if } \|B^T P X\| \rho \geq \varepsilon \\ \frac{-B^T P X \rho}{\varepsilon} \rho & \text{if } \|B^T P X\| \rho < \varepsilon \end{cases} \quad (26)$$

여기서,  $\rho \geq \frac{1}{1 - \alpha_1} \|\gamma\|$  이며,  $\varepsilon$  는 설계자의 의해서 선택될 수 있는 상수이다.

제안된 강인제어기에 의한 풍력발전시스템의 안정성을 조사하기 위해, 다음과 같은 리아프노프(Lyapunov) 함수의 후보를 선정한다.

$$V = X^T P X \quad (27)$$

여기서,  $P$  는 다음의 리아프노프 방정식의 해이다.

$$PA + A^T P = -Q \quad (28)$$

여기서,  $Q=I$ ,  $P>0$  인 대칭양정행렬 (symmetric positive definite matrix)로 둔다.

선정된 리아프노프 함수의 시간에 대한 미분값을 아래와 같이 구한다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{X}^T P X + X^T P \dot{X} \\ &= X^T (P A + A^T P) X \\ &\quad + 2 \{ B^T P X u_\beta + \alpha_1 B^T P X u_\beta + \gamma B^T P X \} \\ &\leq -\|X\|^2 \\ &\quad + 2 \{ B^T P X u_\beta + \alpha_1 B^T P X u_\beta + \gamma B^T P X \} \end{aligned} \quad (29)$$

먼저, 식(26)에서,  $\|B^T P X\| \rho \geq \varepsilon$  일 때 설계된 강인 제어 항을 식(29)에 대입하여 그 부호를 판별한다. 이때, 식(29)의 괄호항의 부호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &\{ B^T P X u_\beta + \alpha_1 B^T P X u_\beta + \gamma B^T P X \} \\ &\leq -\|B^T P X\| \rho - \alpha_1 \|B^T P X\| \rho + \|\gamma\| \|B^T P X\| \\ &\leq 0 \end{aligned} \quad (30)$$

따라서,

$$\dot{V} \leq -\|X\|^2 \quad (31)$$

이 된다.

그리고  $\|B^T P X\| \rho < \varepsilon$  일 때, 설계된 제어 항을 동일하게 대입하여 부호를 판별한다. 이때, 식(29)의 괄호항의 부호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &\{ B^T P X u + \alpha_1 B^T P X u + \gamma B^T P X \} \\ &\leq -\frac{1-\alpha_1}{\varepsilon} \|B^T P X\|^2 \rho^2 + \|B^T P X\| \rho \\ &\leq \frac{\varepsilon}{4(1-\alpha_1)} = \varepsilon_1 \end{aligned} \quad (32)$$

따라서,

$$\dot{V} \leq -\|X\|^2 + \varepsilon_1 \quad (33)$$

이 되며, 여기서,  $\varepsilon_1$  은 조절 가능한 변수이다.

결과적으로, 식(31), (33)를 종합해 볼 때, 설계된 강인 피치제어기에 의한 풍력 터빈 시스템은 평등 한계성(uniform boundedness) 및 평등궁극한계성(uniform ultimate boundedness)의 안정성이 보장된다.<sup>8-10</sup>

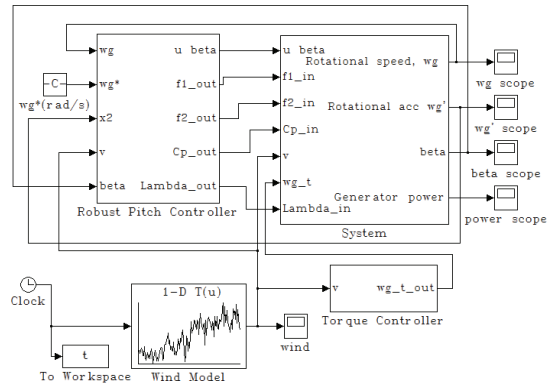


Fig. 2 Simulation block using Matlab/Simulink

Table 1 Parameters of the robust pitch controller

$b_1$	9
$b_2$	6
$P$	[1.5 0.5 ; 0.5 0.5]
$\varepsilon$	0.1

#### 4. 시뮬레이션 및 고찰

시뮬레이션은 Matlab/Simulink를 사용하였으며, 구성된 시뮬레이션 블록은 Fig. 2와 같다. 여기서 2.4 MW급 풍력터빈 모델의 매개변수 값과 Table 1과 같은 제어 매개변수 값이 사용 되어졌다.

풍속모델은 Kaimal 모델을 사용하여 Fig. 3과 같이 나타내었다. 풍속은 전체 시뮬레이션 구간 200초를 4개의 구간으로 나누어 평균풍속이 9m/s에서 15m/s로 증가하도록 하였다. 이로 인해 불확실한 인자인 풍속  $v$ 에 약 20~30%의 불확실성이 존재하게 된다. 풍속에 따른 발전기 축의 회전속도의 변화가 Fig. 4에 나타나 있으며, 정격풍속 이전 구간에서는 풍속에 따라 회전속도가 변하지만, 정격풍속 이후 구간에서는 피치제어로 인해 정격 회전속도 142rad/s가 유지되는 것을 확인할 수 있다. 풍속모델의 4개의 구간에서 비교적 짧은 시간에 정격풍속을 넘나드는 것을 확인할 수 있는데, 정격풍속 이상으로 넘어가는 구간(55sec, 85sec, 95sec 부근)에서는 정격회전속도가 유지되고, 정격 풍속 이하로 떨어지는 구간(130sec)에서는 순간적으로 회전속도도 함께 떨어졌다가 다시 정격속도를 유지하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5는 출력과 위계수의 변화를 나타내는데, 정격풍속 이전 구간에는 토크제어에 의해 최대 출력 파워 계수값

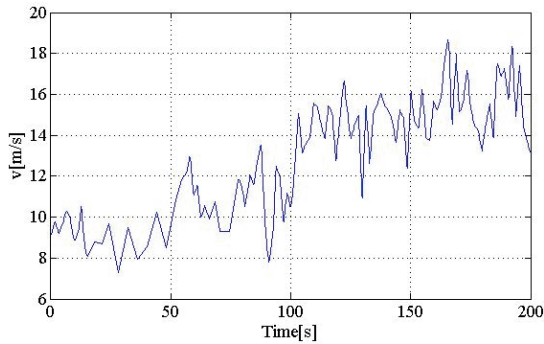


Fig. 3 Wind speed model

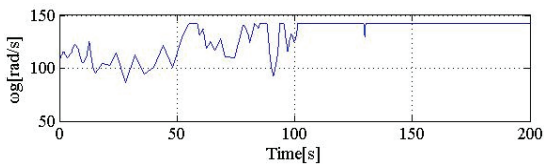


Fig. 4 Rotational speed of generator side

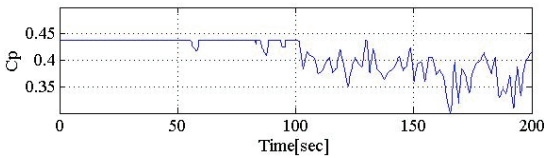


Fig. 5 Power coefficient

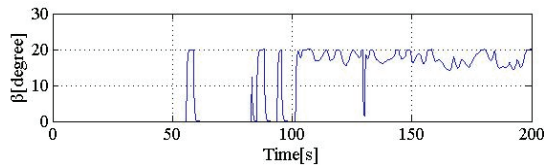


Fig. 6 Pitch angle

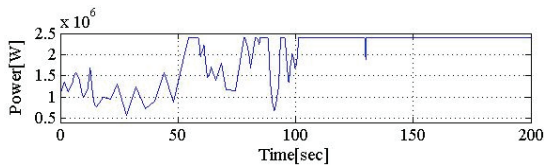


Fig. 7 Generator output power

( $C_{pmax} = 0.438$ ) 을 유지하고, 정격풍속 이후 구간에서는 피치제어가 시작되면서 출력 파워 계수의 값이 떨어지는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6은 피치각의 변화를 나타내며, 정격 풍속 이전 구간에는  $\beta = 0^\circ$  로 작동하지 않다가 정격풍속을 넘으면서

피치각이 변하는 것을 확인할 수 있다. 결국, 풍속에 따른  $\omega_g, C_p, \beta$ 의 변화로 Fig. 7과 같이 발전기 출력파워가 생성된다. 시뮬레이션 결과들로부터, 정격풍속을 넘나들며 변하는 풍속에 대해서 제안된 피치 제어가 불확실한 인자에 강인하게 작동되는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 풍력 발전 시스템의 피치 제어에 대한 연구가 이루어졌다. 먼저 시스템 분석을 위해, 풍력 터빈 시스템과 토크 및 피치 제어부에 대해 수학적 모델링이 이루어졌다. 이를 바탕으로 풍력 터빈 시스템에 존재하는 불확실한 인자들을 파악하다. 그리고 시스템에 적용할 수 있는 강인 피치 제어를 제안하였으며, 리아프노프 함수를 이용해 그 안정성을 증명 하였다. 그리고 정격 풍속을 전후로 한 풍속 모델에 대해 시뮬레이션을 수행함으로써 설계된 피치 제어 시스템의 강인한 성능을 확인하였다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Morimoto, S., Nakayama, H., Sanada, M., and Takeda, Y., "Sensorless Output Maximization Control for Ariable-Speed Wind Generation System using IPMSG," IEEE Trans. Ind. Applications, Vol. 41, No. 1, pp. 60-67, 2005.
2. Hwas, A. and Katebi, R., "Wind Turbine Control Using PI Pitch Angle Controller," Proc. of IFAC Conference on Advances in PID Control, Paper No. 42146, 2012.
3. Hand, M. M. and Balas, M. J., "Systematic Controller Design Methodology for Variable-speed Wind Turbines," National Renewable Energy Laboratory Technical paper, Paper No. NREL/TP-500-29415, 2002.
4. Heier, S., "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems," Wiley, pp. 31-117, 2006.
5. Okedu, K. E., "Wind Turbine Driven by Permanent

- Magnet Synchronous Generator,” Pacific Journal of Science and Technology, Vol. 12, No. pp. 168-175, 2011.
6. Yin, M., Li, G., Zhou, M., and Zhao, C., “Modeling of the Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator for Integration,” IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2007.
  7. Bianchi, F. D., De Battista, H., and Mantz, R. J., “Wind turbine control systems: principles, modelling and gain scheduling design,” Springer, pp. 29-48, 2007.
  8. Corless, M. J. and Leitmann, G., “Continuous State Feedback Guaranteeing Uniform Ultimate Boundedness for Uncertain Dynamic Systems,” IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 26, No. 5, pp. 1139-1144, 1981.
  9. Han, M. C. and Chen, Y. H., “Polynomial Robust Control Design for Uncertain Systems,” Automatica, Vol. 28, No. 4, pp. 809-814, 1992.
  10. Leitmann, G., “On the Efficacy of Nonlinear Control in Uncertain Linear Systems,” J. Dyn. Sys., Meas., Control, Vol. 103, No. 2, pp. 95-102, 1981.