

피치제어를 이용한 풍력발전시스템의 출력제어

임 중 환** · 최 민 호* · 허 중 철** · 김 건 훈***

Power Control of Wind Turbine System Using Pitch Control

Jong-Hwan Lim**, Min-Ho Choi*, Jong-Chul Huh** and Kun-Hoon Kim***

ABSTRACT

This paper derives a modeling of a wind turbine and generator, and presents a power control algorithm for a full pitch-controlled wind turbine system. The design of a controller, in general, is performed by linearizing the torque in the vicinity of a operating point assuming the tip speed ratio is constant. For power control, however, the tip speed ratio is no longer a constant. In this study, a reference pitch model is derived in terms of a wind speed, angular velocity, and pitch angle, which makes it possible to design a controller without linearizing the non-linear torque model of the blade. The validity of the algorithm is demonstrated with the results produced through sets of simulation.

Key words : Wind turbine system, Pitch control, Power control, Reference pitch model

1. 서론

풍력에너지는 대체 에너지 자원 중에서 그 이용 기술이 가장 널리 실용화되어 있으며 경제성 있는 에너지원으로 각광 받고 있으나 현재 국내의 개발 기술은 미진한 편이며 이의 기술 개발은 무엇보다도 시급한 사안이 되고 있다.

풍력발전 시스템의 전체적인 제어방식을 나타내는 Fig. 1은 능동제어 방식을 채택한 제어 방식을 나타

내고 있다. 먼저 정지상태에서 풍속이 증가하여 시동 풍속에 이르면 회전익이 회전하기 시작하여 정격 회전수(발전 시작 회전수)에 이르기까지 속도 제어를 수행한다. 정격회전수에 이르면 발전을 시작하고 이때부터는 출력제어 단계로 들어간다¹⁾. 정격출력 상태에서는 바람의 요동에 따라 급격한 출력 변화로, 발생하는 과부하로부터 시스템을 보호하기 위해 일정 출력을 유지하도록 피치를 제어한다. 풍속이 더욱 증가하여 정격출력 상태를 넘어가면 발전을 중단하고 다시 속도제어 단계로 들어가서 정격회전수가 유지되도록 제어를 하거나 계속해서 풍속이 증가하면 시스템을 정지시킨다.

풍력발전 시스템의 회전익에서 발생하는 토크는 풍속, 회전속도, 그리고 피치각에 대해 심한 비선형성을 보이는데, 출력제어는 동작점이라 불리는 일정한 풍

* 제주대학교 대학원

Graduate School, Cheju Nat'l Univ.,

** 제주대학교 기계·에너지·생산공학부, 산업기술연구소

Faculty of Mechanical, Energy Production Eng. of Mechanical Eng.,

Res. Inst. Ind. Tech., Cheju Nat'l Univ.

*** 유체기계 연구팀, 한국에너지 기술연구소

Korea Institute of Energy Research

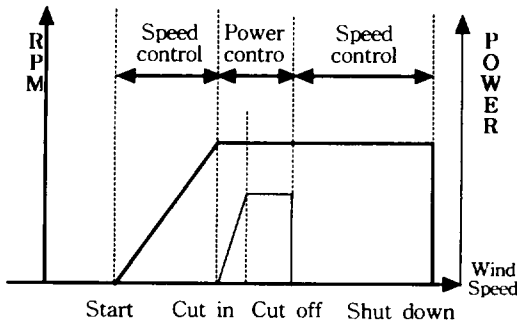


Fig. 1 Control strategy of a wind turbine system

속, 회전속도, 그리고 피치각 범위 내에서 수행되므로 이 동작점 부근에서 선형화하여 선형제어 이론을 적용하거나^{2,3)} 풍속에 따라서 동작점을 변화시켜 선형화 하여 "gain schedule" 기법을 사용하는 것이 대부분이다⁴⁾. 이와 같은 방법들의 공통점은 출력제어 단계에서 회전속도는 일정하다는 가정 하에 토크를 단지 풍속과 피치각의 함수로만 고려하는 것이다.

기계적인 에너지를 전기적인 에너지로 변환시켜주는 발전기는 자기여자 능력을 확보할 수 있는 동기발전기와 유도발전기로 나눌 수 있으며 이중 동기발전기는 원하는 전압을 쉽게 얻을 수 있고, 운전시 무효전력을 필요로 하지 않기 때문에 전압 변동이 작다는 장점을 가지고 있으나 계통선과의 동기화 과정이 어렵고, 주파수 및 위상의 동기화 과정에서 손실이 발생한다는 단점을 가지고 있다. 유도형 발전기는 회전자 회로 및 변환기를 이용한 주파수의 제어가 가능하며, 다른 발전시스템과의 동기화 과정이 용이하고, 비용과 유지가 용이한 장점을 가지고 있다. 하지만 운전시 무효전력이 필요하므로 전압변동이 크다는 점과 독립 운전시 전압 주파수의 제어가 어렵다는 단점이 있으나 최근 유도형 발전기에 대한 제어 기술이 발전함에 따라 전압과 주파수의 제어에 관한 어려움이 많이 극복되었다⁵⁾.

본 논문에서는 역률로 인한 에너지 손실은 있으나 구조가 간단하며 계통선과 연계가 용이한 유도형 발전기를 채택하였고, 신속한 제어가 가능한 유압시스템을 피치 조절작동기로 하고, full-span pitch 제어방식을 채택하여 전체 시스템을 모델링하였다. 또한 회전익의 공역학적 모델을 미지 시스템으로 두고 풍속

과 속도 오차에 따른 기준 피치각 모델을 이용하여 출력을 제어하는 방법을 제안하고 시뮬레이션을 통해 구성 시스템의 입력에 대한 제어 성능을 분석한다.

II. 시스템 모델링 및 운동방정식

2.1. 회전익의 공역학적 모델

Fig. 2는 회전익에 작용하는 속도와 힘 그리고 모멘트를 도시화 한 것으로 피치각이 θ 인 날개단면에 기준을 두고 상대좌표를 사용한 속도 삼각형이다.

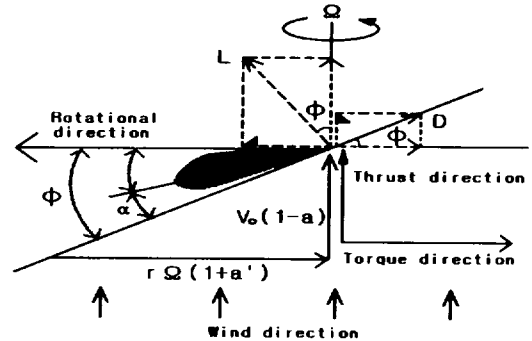


Fig. 2 Relative flow velocities and elemental forces

회전면에서의 풍속은 일정하다고 가정하면 날개를 회전시키는 회전방향 힘 성분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_T = C_L \sin \phi - C_D \cos \phi \quad (1)$$

여기서, C_L 과 C_D 는 각각 L 과 D 방향의 양력변화와 항력계수이다. 또한 θ 는 다음과 같다.

$$\phi = \tan^{-1} \frac{V_0(1-a)}{r\Omega(1+a')} = \alpha + \theta \quad (2)$$

식(2)에서 a 와 a' 은 각각 축방향 바람속도의 간섭계수와 반경방향 간섭계수로서 수치 해석적인 반복계산으로 구해진다. 따라서, 회전익에 발생하는 토크는 날개의 미소요소에 작용하는 토크를 적분하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Q = \int_0^R \frac{1}{2} \rho B c W^2 C_T r dr \quad (3)$$

여기서, 공기밀도 ρ 는 공기밀도, R 은 회전익의 반경, B 는 날개개수, 그리고 C 는 코드길이이다.

회전익의 특성을 나타내는 무차원 변수인 주속비 (Rotor tip speed ratio)와 국부주속비(Local tip speed ratio)는 다음과 같이 정의된다.

$$\lambda_R = \frac{R\Omega}{V_0}, \quad \lambda = \frac{r\Omega}{V_0} \quad (4)$$

식(3)과 식(4)를 이용하여 C_q 를 표현하면 다음과 같다.

$$C_q = \frac{Q}{\frac{1}{2} \rho V_0^2 R A} \quad (5)$$

$$= \frac{1}{\lambda_R^3} \int_0^{\lambda_R} \sigma_r \frac{(1-a)^2}{\sin^2 \phi} C_T \lambda d\lambda$$

여기서 A 는 회전면의 면적을 나타낸다. 식(5)에 식(3)을 대입하면 회전익에 발생하는 출력계수는 다음 식과 같다.

$$C_p = \frac{Q\Omega}{\frac{1}{2} \rho V_0^3 A} \quad (6)$$

$$= \frac{8}{\lambda_R} \int_0^{\lambda_R} a' (1-a)^2 \lambda^3 d\lambda$$

식(5)와 식(6)에 나타난 바와 같이 토크 계수와 출력계수는 주속비와 피치각의 함수가 되며, 사용된 날개의 제원은 Table 1과 같다.

2.2. 유압계통 모델

Fig. 3은 풍력발전시스템에 사용되는 비례전자 방향제어밸브의 내부 구조도를 나타낸 것이다. 일반적으로 비례 전자 방향 제어 밸브의 입력 전압과 출력 유량 사이의 관계는 1차 지연 요소로 표시되지만, 비례 전자 방향 제어 밸브의 응답은 시스템의 응답에 비해서 매우 빠르기 때문에 응답의 지연을 무시하고

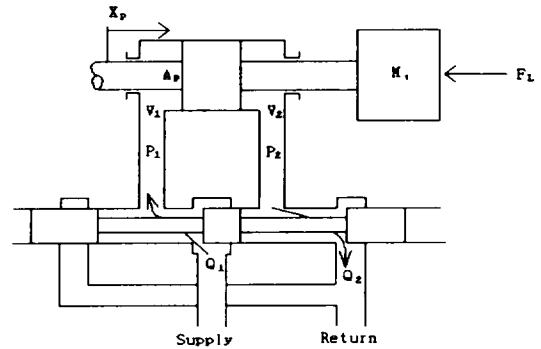
Table 1. Resources of blade

Items	Resources
Blade section	NACA 4415
Tip chord	184.5 mm
Root chord	337.7 mm
Length	1500 mm
Hub Length	300 mm
Taper Ratio	0.6

동작점 부근에서 선형화하면 입력전압과 피스톤 변위에 대한 관계는 다음과 같이 얻어진다^{6,7)}.

$$x_p = \frac{\frac{K_q}{A_p} V_d - \frac{K_{ce}}{A_p^2} \left(1 + \frac{V_t}{4 \beta_e K_{ce}} s\right) F_L}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\delta_h}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad (7)$$

여기서, V_d 는 입력전압, V_t 는 챔버의 총체적, β_e 는 압축계수, $K_{ce} = \left(\frac{\partial Q_L}{\partial P_L} \right)_{v_t = const.}$, $K_q = \left(\frac{\partial Q_L}{\partial v_d} \right)_{F_L = const.}$ 를 나타내며, 고유진동수 $\omega_h = \sqrt{\frac{4\beta_e A_p^2}{V_t M_1}}$ 로 정의되며, 유압 감쇠비 $\delta_h = \frac{K_{ce} \sqrt{\beta_e M_1}}{A_p} + \frac{B_p}{4A_p} \sqrt{\frac{V_t}{\beta_e M_1}}$ 로 정의된다. 또한 F_L 은 외부에서 가해지는 부하로서 바람에 의해 발생하는 회전익의 축방향 힘에 의한 외력이다.



- Q : flow rate, P : pressure, V :volume.
- $P_L = P_1 - P_2$
- M_1 : piston mass, A_p : area of the piston
- $Q_L = (Q_1 + Q_2)/2$

Fig. 3 Hydraulic propositional Valve

2.3. 유도발전기 모델링

유도기에서 슬립 s 는 동기속도 ω_e 와 회전자의 기계각속도 ω_m 의 비로 다음 식과 같이 표현된다.

$$s = \frac{\omega_e - \omega_m}{\omega_e} \quad (8)$$

Fig. 4는 유도기의 슬립과 토크의 특성관계를 나타내며, 1) $\text{slip} > 0$ 일 때는 회전자의 속도가 동기속도보다 작을 때를 나타내며 유도기는 모터의 특성을 가진다. 또한 -1) $\text{slip} < 0$ 일 때는 회전자의 속도는 동기속도보다 빠른 상태이며 회전자에서는 전류가 발생하여 발전기로서의 역할을 하게 된다⁸⁾.

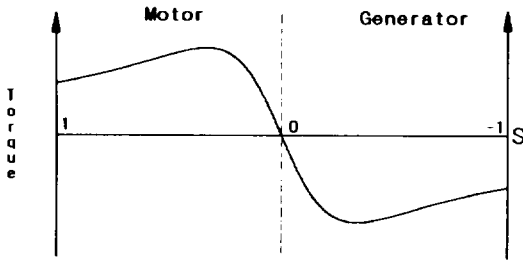


Fig. 4 Torque and speed of rotation characteristic of an induction machine

유도기의 동특성은 고정자와 회전자의 상호결합 때문에 전동기가 정지하고 있는 경우를 제외하고는 시변계수를 가지는 복잡한 미분방정식으로 표현된다. 따라서 기준좌표계 이론을 적용하여 d-q좌표계와 동기좌표계로의 변환을 통하여 모델링하게 된다.

유도전동기의 동기좌표 등가회로는 Fig. 5와 같으며 전압방정식은 식(9)와 식(10)과 같은 방식의 정지좌표와 동기좌표의 변환에 의해 식(11)과 식(12)로 나타낼 수 있다⁸⁾. 여기서 $L_s = L_{ls} + L_m$, $L_r = L_{lr} + L_m$ 을 나타낸다.

$$V_{ds}^e = (R_s + pL_s) i_{ds}^e - \omega L_s i_{qs}^e + pL_m i_{ds}^e - \omega L_m i_{qs}^e \quad (9)$$

$$V_{qs}^e = \omega L_s i_{ds}^e + (R_s + pL_s) i_{qs}^e + \omega L_m i_{ds}^e + pL_m i_{qs}^e \quad (10)$$

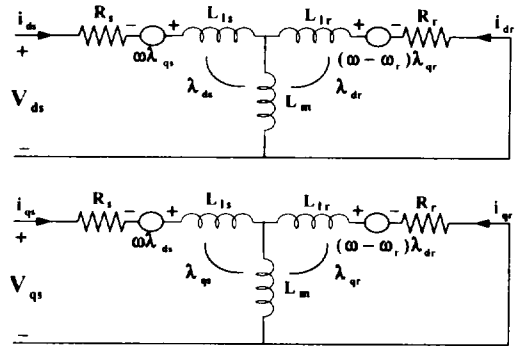


Fig. 5 Equivalent circuit representation of an induction machine in the synchronous rotating reference frame

$$V_{dr}^e = pL_m i_{ds}^e - (\omega - \omega_r) L_m i_{qs}^e + (R_r + pL_r) i_{dr}^e - (\omega - \omega_r) L_r i_{qr}^e \quad (11)$$

$$V_{qr}^e = (\omega - \omega_r) L_m i_{ds}^e + pL_m i_{qs}^e + (\omega - \omega_r) L_r i_{dr}^e + (R_r + pL_r) i_{qr}^e \quad (12)$$

따라서 위의 식들은 다음 식과 같은 상태방정식으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} V_{ds}^e \\ V_{qs}^e \\ V_{dr}^e \\ V_{qr}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} p + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_c L_s & 0 & -\omega_c L_m \\ \omega_c L_s & 0 & \omega_c L_m & 0 \\ 0 & -s\omega_c L_m & 0 & -s\omega_c L_r \\ s\omega_c L_m & 0 & s\omega_c L_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \\ i_{dr}^e \\ i_{qr}^e \end{bmatrix} \quad (13)$$

유도형 발전기의 입력 및 출력은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \frac{3}{2} \omega_r L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{qr} i_{ds}) \quad (14)$$

여기서 회전자의 기계각속도를 ω_E 라 하면 전기적 각속도 $\omega_r = \frac{p}{2} \omega_E$ 이므로 식(14)는 다음 식과 같이 표현된다.

$$P = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m \omega_E (i_{qs} i_{dr} - i_{qr} i_{ds}) \quad (15)$$

발전기 토크는 전력에 ω_E 을 나눈 값이므로 다음 식과 같다.

$$Q_E = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{qr} i_{ds}) \quad (16)$$

또한 속도방정식은 다음 식과 같은 미분방정식의 형태로 나타난다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \omega_r &= \left(\frac{P}{2J_m}\right)T_e - \left(\frac{P}{2J_m}\right)T_L - \left(\frac{B_m}{J_m}\right)\omega_r \\ &= \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) \frac{L_m}{J_m} (i_{qs} i_{dr} - i_{qr} i_{ds}) \\ &\quad - \left(\frac{P}{2J_m}\right)T_L - \left(\frac{B_m}{J_m}\right)\omega_r \end{aligned} \quad (17)$$

2.4. 시스템의 운동방정식

Fig. 6은 풍력발전 시스템의 구성도로써 Fig. 6(a)에서 회전익을 하나의 외팔보로 간주하여 시스템의 간략화 한 도안을 Fig. 6(b)와 같이 나타내었다.

여기서 회전익, 주축, 허브, 그리고 구동부 기어축의 회전중심은 모두 동일한 선상에 있으므로 이들의 관성모멘트들의 합을 J_1 으로 나타내었으며, 종동부 기어축과 발전기 축의 관성모멘트들은 J_2 로 나타내었다. 단 증속된 기어축의 관성 모멘트는 종동부 기어의 관성모멘트와 발전기의 관성모멘트에 비해 매우 작으므로 무시하였다.

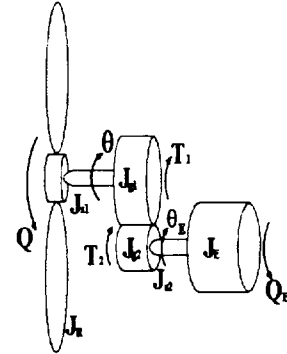
각 기어열의 운동 방정식은 다음과 같다.

$$J_1 \ddot{\theta} = Q - T_1 \quad (18)$$

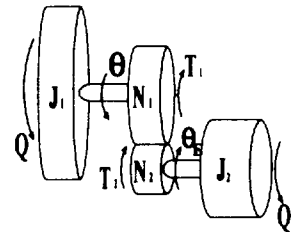
$$J_2 \ddot{\theta}_E = T_2 - Q_E \quad (19)$$

주동·종동 기어의 행한 일은 같고 이송된 회전길이는 같기 때문에 전체 시스템의 운동방정식은 다음 식과 같다.

$$\frac{J_1}{K} \ddot{\theta}_E + KJ_2 \ddot{\theta}_E = Q - KQ_E \quad (20)$$



(a) Schematic diagram



(b) Approximate diagram

Fig. 6 Wind turbine system

여기서 $K = \frac{N_1}{N_2}$ 이다.

III. 제어기 설계

3.1. 유압 제어기 설계

식(7)에서 F_L 은 풍차날개에 발생한 축방향으로 발생하는 힘에 의한 것으로서 이것 역시 Glauert 이론에 의하면 상당히 복잡한 비선형이다. 그러나 유압작동기의 경우 풍력시스템에 비해 그 응답이 상당히 빠르고 전달함수를 구할 수 있기 때문에 이 F_L 을 외란으로 간주하여 전체 시스템의 응답보다 빠른 시간 내에 외란의 영향이 사라지도록 제어기를 설계하고자 한다. Fig. 7은 PID제어기를 부착한 유압시스템의 블록선도이다.

K_r 는 피치각과 유압피스톤의 변위의 관계를 나타

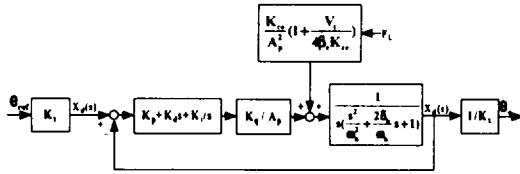


Fig. 7 Block diagram of the hydraulic control system

내는 비례상수이다. F_L 을 외란으로 간주하여 무시하며 Table 2와 같은 Osung Taiyo사 유압실린더의 실제 물성치를 대입하고 설계의 편이를 위하여 식(7)을 2차로 근사화하여 입력전압에 대한 피스톤의 변위를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{X_p(s)}{V_d(s)} = \frac{232.56}{s^2 + 59.3s + 232.56} \quad (21)$$

따라서 기준 변위 입력 X_d 와 출력 변위 X_p 에 대한 전달함수는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{X_p(s)}{X_d(s)} = \frac{232(K_D s^2 + K_P s + K_I)}{s^3 + (232 K_D + 59) s^2 + 2321 K_P s + 232 K_I} \quad (22)$$

Table 2. Physical parameters and their values of the hydraulic control system

Symbol	Value	
A_o	4.42	[cm ²]
M_t	7.83	[kg]
V_t	34.29	[cm ³]
B_o	0.1	[N-cm-s]
K_{ce}	0.0685	[(cm ³ /s)/(N/cm ²)]
K_o	16.6	[(cm ³ /s)/V]
β_e	1.4×10^4	[kg/cm ²]
F_L	1.00	[N]

풍력시스템에 비해 빠른 유압시스템의 응답을 얻기 위해 단위 계단응답 조건을 $t_r < 0.2$, $t_s < 0.5$, $M_p < 0.2$ 로 하여 극배치법을 이용하여 이득을 조정된 결과 PID제어기의 각 계수들을 $K_p = 39.233$, $K_i = 510.03$, $K_d = 0.4995$ 를 얻었으며, Fig. 8에 그 결과를 나타내었다. 그림에서 오버슈트는 0.185정도이고, 정착 시간은 약 0.2초이다.

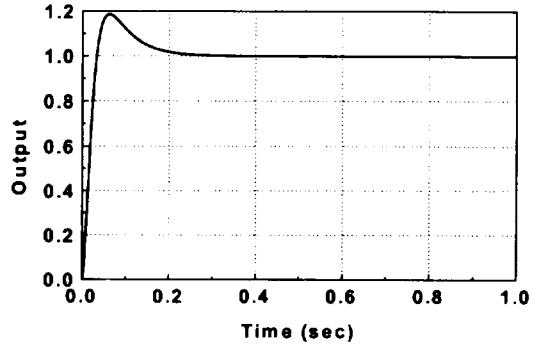


Fig. 8 Unit step response of the hydraulic system

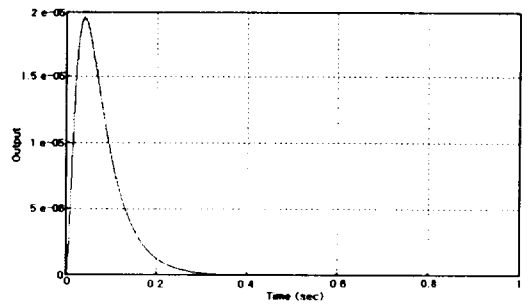


Fig. 9 Response of the hydraulic system to a unit step disturbance

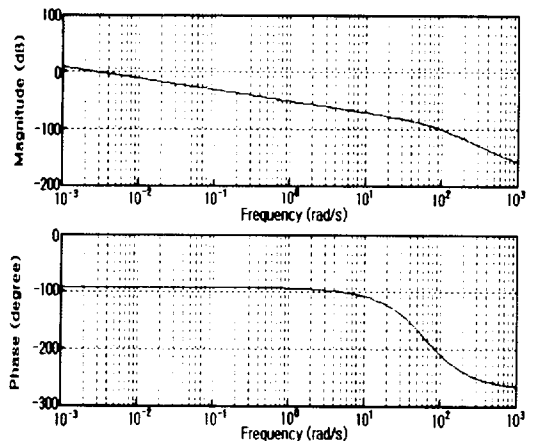


Fig. 10 Bode plot of system from disturbance

Fig. 9는 이 시스템에 단위 계단 외란 ($F_L=1$)이 작용했을 때의 응답으로서 최대 크기가 0.0013 정도이고 0.2초 이내에 외란의 영향이 사라짐을 알 수 있

다. 또한 예상치 못한 외란 F_L 에 대한 시스템의 상대 안정도를 알아보기 위하여 외란에 대한 보드선도를 구한 결과 Fig. 10과 같았다. 그림에서 이득여유는 86db, 위상여유는 89도 정도로서 충분한 상대안정도가 보장된다고 사료된다.

3.2. 출력 제어기설계

3.2.1 기준피치각 모델

출력제어에 있어서 기준입력은 출력값이나 실제 제어가 되는 것은 피치각이므로 출력오차 신호로부터의 기준 피치각을 계산하는 모델이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 단순화된 토오크 모델을 이용하여 다음과 같이 기준 피치각 모델을 도출하였다. 먼저 토오크 계수를 다음과 같이 주속비와 피치각의 함수로 정의 정격출력시 동작점에서 주속비와 피치각을 각각 λ_0 , θ_0 로 하여 선형화 하면 다음과 같다.

$$C_p = C_{p0} + M_0(\lambda - \lambda_0) + M_1(\theta - \theta_0) \quad (23)$$

여기서, $M_0 = \frac{\partial C_p}{\partial \lambda} \Big|_{\lambda_0, \theta_0}$, $M_1 = \frac{\partial C_p}{\partial \theta} \Big|_{\lambda_0, \theta_0}$ 이다.

M_0 와 M_1 은 각각 피치각 일정 즉, $\theta = \theta_0$ 일 때 λ 의 변화에 따른 출력 계수 곡선에서 구할 수 있다.

다음으로 현재의 풍속, 회전수, 주속비, 그리고 피치각을 각각 $V_c, \omega_c, \lambda_c, \theta_c$ 라 할 때 발생하는 출력은 다음 식과 같다.

$$P_c = \{ C_{p0} + M_0(\lambda_c - \lambda_0) + M_1(\theta_c - \theta_0) \} \times \frac{1}{2} B \rho A V_c^3 \quad (24)$$

또한 현재 상태(V_c, ω_c, λ_c)에서 기준 출력이 되기 위해 필요한 피치각을 θ 라 할 때 발생하는 출력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \{ C_{p0} + M_0(\lambda_c - \lambda_0) + M_1(\theta - \theta_0) \} \times \frac{1}{2} B \rho A V_c^3 \quad (25)$$

식(25)에서 식(24)를 빼면 다음과 같은 출력-피치각 관계식을 얻을 수 있다.

$$\Delta \theta = \frac{1}{M_1 \frac{1}{2} B \rho A V_c^3} \Delta P \quad (26)$$

여기서, $\Delta \theta = \theta - \theta_c$, $\Delta P = P - P_c$ 를 나타낸다. 식(26)을 정리하면 출력 오차에 따른 기준피치각 θ_{ref} 는 다음 식과 같이 계산된다.

$$\theta_{ref} = \theta_c + \frac{2}{M_1 B \rho A V_c^3} \Delta P \quad (27)$$

3.2.2 제어 알고리즘

Fig. 11은 풍력발전 시스템의 정격 출력을 유지하기 위한 출력 제어시스템의 블록선도를 나타낸다.

그림에서 제어기에 입력된 출력 오차는 PID제어기에 입력되어 기준피치각 모델을 통하여 기준 피치각인 θ_{ref} 로 계산되어 유압제어기에 입력이 되며 유압시스템을 거쳐 실제 피치각인 θ 로 출력된다. 회전익 모델에서는 Glauert이론에 의해, 입력된 피치각과 풍속, 그리고 현재의 각속도에 따라 회전익의 토오크가 계산되고, 이 값이 증속기를 통하여 동기속도 이상으로 회전하면 풍력발전 시스템에 회전속도가 입력되어 발

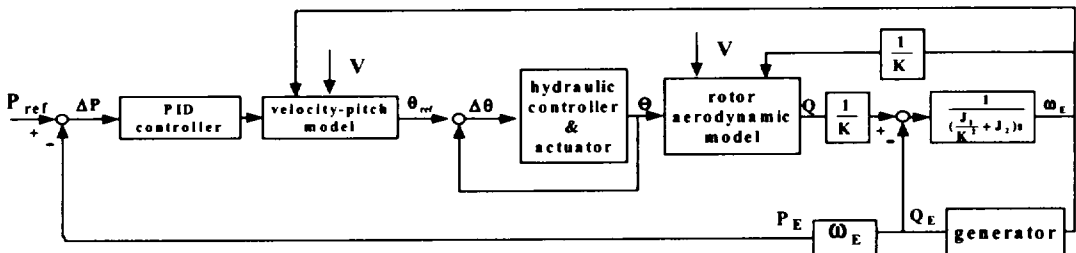


Fig. 11 Block diagram of the power controller

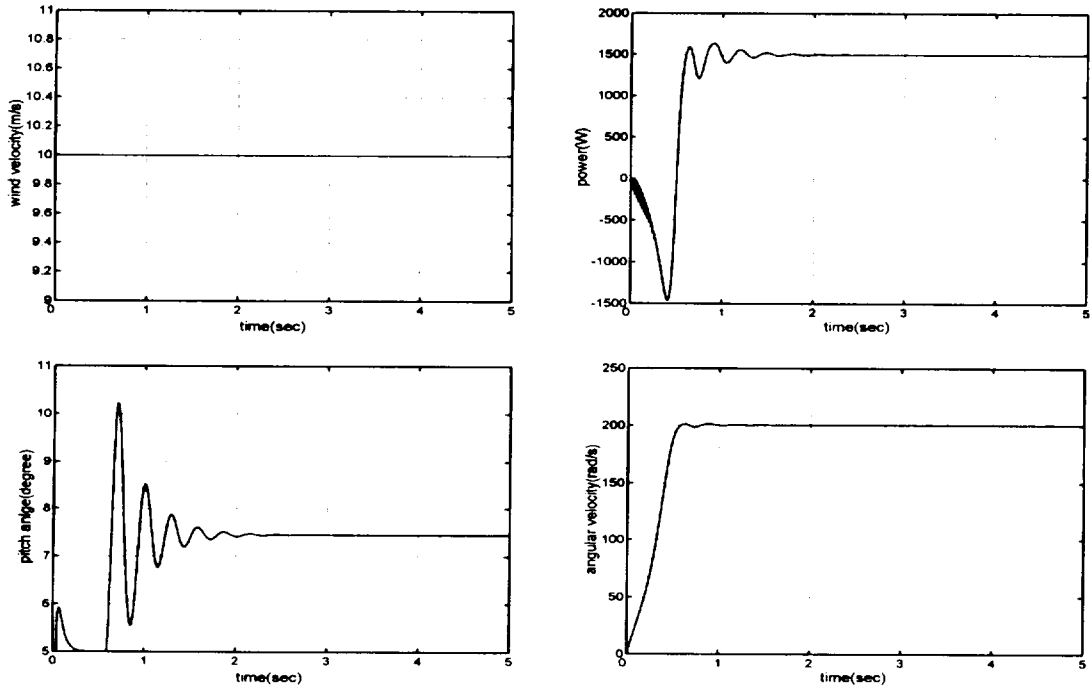


Fig. 12 System response($V = 10\text{m/s}$)

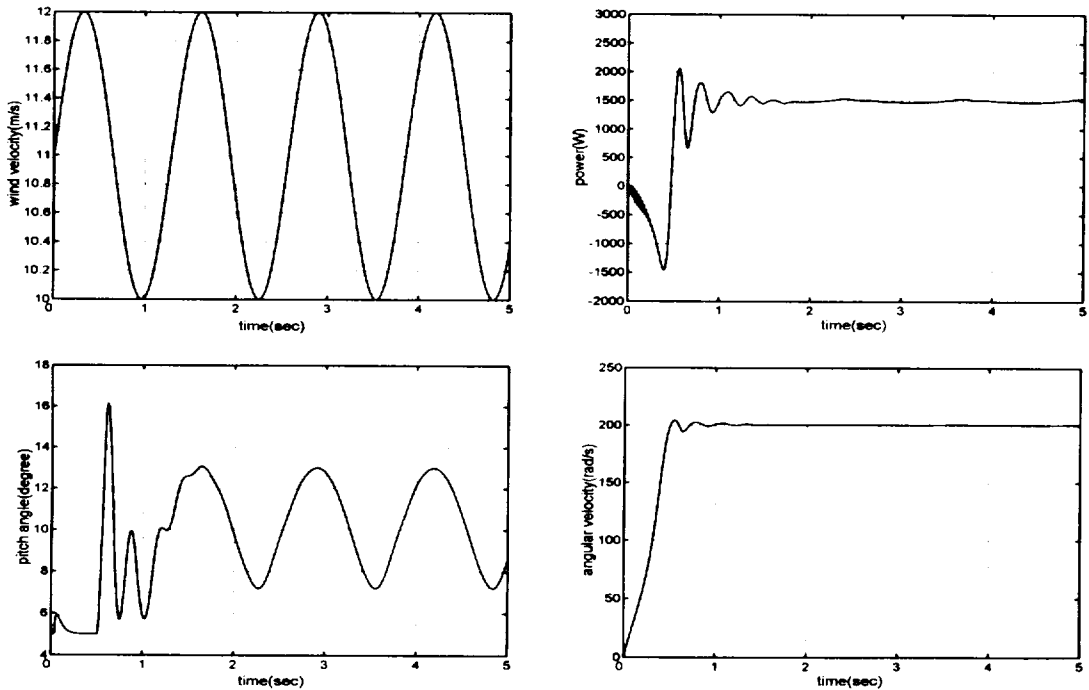


Fig. 13 System response($V = (10 + \sin t)\text{m/s}$)

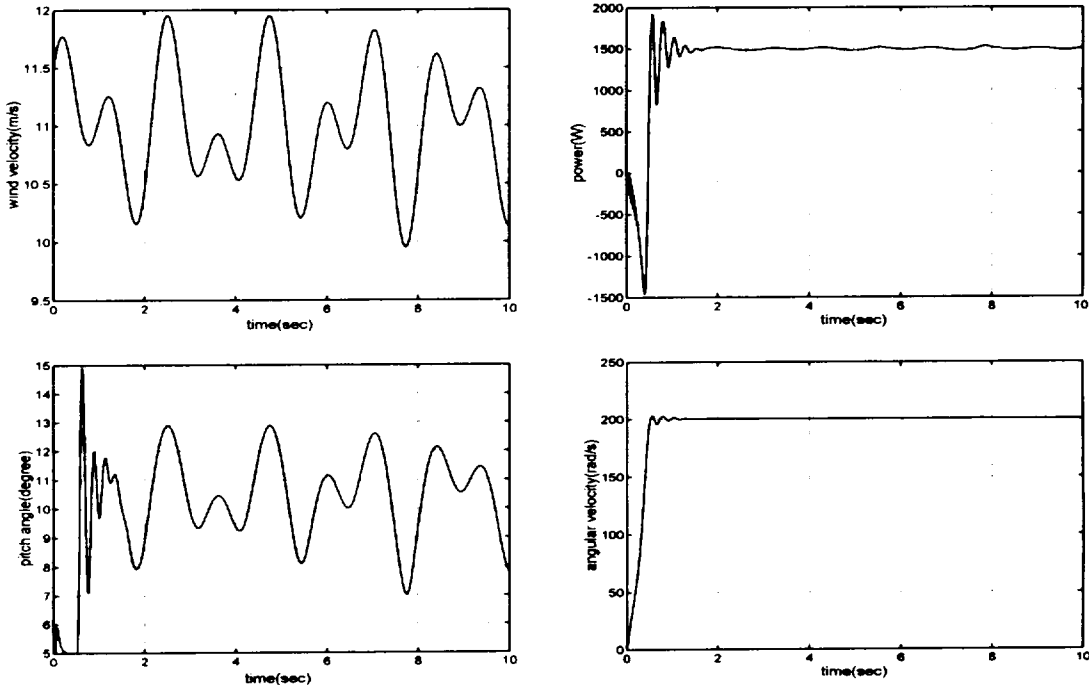


Fig. 14 System response(V = random)

전기는 출력을 발생하며, 이 값은 다시 입력측으로 피드백 되어 기준출력과 오차를 제어기에 입력함으로써 정격 출력상태를 유지할 수 있도록 제어된다.

IV. 결과 및 고찰

이상과 같이 설계된 제어시스템의 성능을 분석하기 위해, 다양한 풍속에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 기준입력은 정격풍속을 10m/s로 하였으며, 이때 회전익의 최대출력과 발전기의 정격출력을 고려하여 1500W 설정하였다. 또한 시스템의 물성치는 Table 3과 같으며 정격풍속에서 오버슈트의 최소화과 정상상태 도달시간의 단축을 위해 PID이득을 조절한 결과 $K_p=0.1$, $K_d=0.0011$, $K_i=0.0001$ 를 얻었다.

Fig. 12는 정격풍속을 10m/s, 정격출력 1500W일 때 시스템의 단위계단 응답으로서 최대 오버슈트는 8.9% (134W), 정상상태오차는 0.02% 이내에서 분포하였으며 발전기의 회전수는 정상상태에서 200.6(rad/sec)였다. 실제의 자연환경에서 풍력발전 시스템의 제어 환

Table 3. Physical parameters of a wind turbine system

Symbol	Value
J_{eq}	0.1 (Kg · m ²)
b	0.013(N · S)
$n(= \frac{M_1}{M_2})$	5
B	2
ρ	1.2 (Kg/m ³)
K_r	0.164 (mm/degree)

경은 풍속의 변화가 심하므로 발전기를 동기속도 이상의 속도에서 회전시킬 수 있는 범위의 풍속에서 삼각함수 형태와 랜덤하게 변하는 경우의 풍속을 조건으로 설정하였고, 이때의 응답을 Fig. 13, Fig. 14에 나타내었다.

Fig. 13의 경우 출력은 정상상태에서 사인파 형태와 비슷한 오차가 발생하고 있으나 오차의 범위는 2%미만으로서 실제 풍속은 1초 단위로 심하게 변하지 않는다는 점을 고려하면 사인파의 풍속에서도 안

정된 출력을 유지하고 있다고 사료된다.

Fig. 14는 풍속이 초당 2회 이상의 급격한 변화가 이루어지는 악조건상의 풍속을 모사한 경우이다. 이때의 풍속의 분포는 최대 12m/s에서 최소 9.8m/s까지 분포하며 기준입력은 1500W로 설정이 되어있다. 정상상태에서의 오차는 2.2%(최대 33W) 이내이며 발전기의 회전속도는 200.6-200.7rad/s 사이에서 분포하고 있으며 풍속의 변화가 심한 점을 감안하면 양호한 결과를 보여주고 있음을 알 수 있다.

이상과 같이 풍속의 변화에 따른 풍력발전 시스템의 출력제어를 시뮬레이션 한 결과 정격풍속 이상의 풍속에서도 시스템의 출력은 오차 범위가 $\pm 2.2\%$ 범위 내로서 안정적으로 유지함을 알 수 있다.

V. 결론 및 향후 연구 방향

자연상태에서의 풍속은 특성상 시간에 대한 변화의 폭과 범위가 상당히 불규칙한 경향을 가지고 있다. 이로 인해 회전익을 이용해 발전시스템을 구동하기 위해서는 피치제어를 통한 회전속도와 발생토크의 제어가 필수적이다. 본 연구에서는 풍력발전 시스템의 출력 제어를 위해 출력 오차에 따른 기준 피치각을 구하기 위해 회전수와 피치각의 관계 모델을 도출, 출력 제어알고리즘을 제안하였으며, 시뮬레이션으로 검증한 결과 정격풍속 이상의 풍속과 급격히 변화하는 풍속에 대해서도 정격출력에서 $\pm 2.2\%$ 이내에 출력이 유지되어 충분한 안정성을 가지고 있음을 확인하였다.

참고문헌

- 1) Viterna, L. A. and Corrigan, R. D., 1966. Fixed Pitch Rotor Performance of Large Horizontal Axis Wind Turbines. DOE/NASA Workshop on Large Horizontal Axis Wind Turbines, Cleveland, Ohio.
- 2) Estanqueiro, A. I., Ferreira de Jesus, J. M., Gil Saraiva, J. A., 1991. WECS Unsteady Power Output Simulation. Wind Energy: Technology and Implementation. Amsterdam EWEC, pp.618-622.
- 3) Novak, P., Ekelund, T., Jovik, I. and Schmidtbauer, B., 1995. Modeling and Control of variable-speed Windturbine DriveSystem Dynamics. IEEE control systems, Vol. 15, No. 4, pp.28-38.
- 4) Leith, D. J., Leithead, W. E., 1996. Appropriate realization of gain-scheduled controllers with application to wind turbine regulation. International Journal of Control, Vol.65, No.2, pp.223-248.
- 5) 이춘식, 김광호, 1990. 12. 소형 수평축풍차 및 풍력발전시스템 개발에 관한 연구. 한국전력공사기술연구원, KRC-89G-T09.
- 6) Herbert, E., Merrit, 1967. Hydraulic Control Systems, John Wiley & Sons, Inc, pp.145-150.
- 7) 임종환, 부성환, 허종철, 김건훈, 2000. "수평축 풍력발전기의 모델링 및 속도제어." 한국태양에너지학회 논문집, 제20권 1호, pp.1-9.
- 8) 기초전력공학공동연구소, 2000. 하계교육강좌, pp. 3-2, 3-13.