

풍력터빈 축 진동 응답에 대한 피치 게인-스케줄링의 효과

임채욱*†, 조준철**

An Effect of Pitch Gain-Scheduling on Shaft Vibration Response of Wind Turbine

Chae-Wook Lim*†, Jun-Chul Jo**

Key Words : Wind Turbine(풍력터빈), Pitch Control(피치제어), Pitch Gain-Scheduling(피치 게인-스케줄링), 2-Mass Model(2-질량 모델), Drive-Train(드라이브-트레인), Vibration(진동), High Wind Speed(고풍속), Stability(안정성)

ABSTRACT

Pitch control of wind turbine is activated above rated wind speed for the purpose of rated power regulation. When we design pitch controller, its gain-scheduling is essential due to nonlinear characteristics of aerodynamic torque. In this study, 2-mass model including a vibration mode of drive-train for a 2 MW wind turbine is considered and pitch control with gain-scheduling using a linearization analysis of the nonlinear aerodynamic torque is applied. Some simulation results for the pitch gain-scheduling under step wind speed are presented and investigated. It is shown that gain-scheduling in pitch control is important especially in the region of high wind speeds when there exists a vibration mode of drive-train.

1. 서 론

풍력터빈은 바람이 가진 에너지가 로터 블레이드를 회전시켜 기계적인 에너지로 전환하여 발전기를 통해 전기를 생산하는 기계이다. 최근 풍력 터빈의 경향은 수 MW급으로 대형화되고 페더링 방향의 피치제어 방식인 가변속도-가변피치 형태를 취한다. 대형화됨에 따라 정격파워 이상에서 작동하는 피치제어가 더욱 중요하게 되었다. 풍력터빈의 피치제어는 풍속에 따른 피치각을 제어하는 방식이고 풍속의 변화에 대한 효율적인 운행과 비상시 안전 대비에 우수한 능력이 가장 큰 장점이다^(1,2).

풍력터빈의 피치제어 목적은 정격풍속 이상에서 피치각을 조절하여 정격출력을 생산하는 것이다. 피치각을 조절하는 피치제어에 있어서 피치 게인-스케줄링은 필연적으로 사용되고 있다. 피치 게인-스케줄링을 사용하는 이유는 바람과 블레이드의 상호작용에 따른 공기역학적 토크가 풍속, 로터 속도, 블레이드 피치각에 따라 매우 비선형적인 특성을 보이기 때문이다^(3,4). 특히 피치각에 대한 공기역학적 토크의 비선형성은 주로 피치제어에 큰 영향을 미친다⁽⁵⁾. 1-질량 모델

에 대하여 공기역학적 토크의 비선형성이 피치제어의 응답에 미치는 영향에 대한 연구 뿐만 아니라, 드라이브-트레인의 진동모드가 고려된 2-질량 모델에 대해서도 공기역학적 토크의 비선형성이 피치제어의 응답에 미치는 영향에 대한 연구도 매우 중요하다.

2-질량 모델의 풍력터빈에 대하여 피치제어기의 설계 시에 피치 게인-스케줄링이 구조적으로 포함된 피치제어기에 관한 논문과 보고서 등이 발표되고 있지만^(3,4,6-9), 공기역학적 토크의 비선형성이 풍력터빈의 진동 모드의 응답에 미치는 피치 게인-스케줄링의 영향에 대한 결과는 아직 구체적으로 보이지 않는다.

본 논문에서는 드라이브-트레인의 진동 모드가 고려된 2-질량 모델을 이용하여 피치 PI 제어기의 게인-스케줄링 응답을 확인하고자 한다. 이를 위해 공기역학적 토크의 비선형성이 페루프 피치계의 특성에 미치는 영향을 선형화를 통하여 확인하고, 정격용량이 2 MW인 풍력터빈에 대한 2-질량 모델을 이용하여 계단풍속에 대한 응답을 수치실험을 통하여 확인한다. 풍력터빈의 드라이브-트레인의 진동 모드가 존재하는 경우 피치 게인-스케줄링이 고풍속 영역에서 피치제어기의 안정성과 응답에 미치는 영향을 보이고자 한다.

* 한밭대학교 기계공학과

** 한밭대학교 기계공학과 대학원생

† 교신저자, E-mail : cwlim@hanbat.ac.kr

2. 풍력터빈 모델

풍력터빈은 블레이드, 로터, 회전축, 기어박스, 타워 등 여러가지 구성요소들로 이루어진 복합시스템이다. 여기에서는 기어박스가 있는 풍력터빈에 대해서 회전축의 진동 특성을 표현한 2-질량 모델을 고려하였다. 공기역학적 토크(T_r)는 식 (1)과 같고 출력계수(C_p), 풍속(V), 주속비(λ), 피치각(β), 로터의 반지름(R)으로 표현된다. 주속비는 풍속에 대한 블레이드 끝단 속도의 비를 나타낸 것으로 식 (2)와 같다.

$$T_r(t) = \frac{\pi \rho R^3}{2} \frac{C_p(\lambda(t), \beta(t))}{\lambda(t)} V^2(t) \quad (1)$$

$$\lambda(t) = \frac{\Omega_r(t)R}{V(t)} \quad (2)$$

여기서 출력계수는 주속비와 피치각에 대하여 비선형적인 특성을 나타내는데 본 논문에서 고려된 출력계수는 Fig. 1과 같으며 최대 출력계수($C_{p_{max}}$)는 0.46이다. 공기역학적 토크의 비선형적 특성으로 인해 풍력터빈은 매우 비선형적인 것을 확인할 수 있다.

풍력터빈을 2-질량 모델로 나타내면 3차의 시스템으로 표현되는데, 기어박스가 있는 풍력터빈의 경우 미분방정식은 로터측 또는 발전기측의 상태로 표현할 수 있다. 여기에서는 Fig. 2와 같이 발전기측에서의 상태를 고려하였으며, 운동방정식은 식 (3)과 식 (4)로 표현되고, T_{sh} 는 축 토크로 식 (5)와 같다.

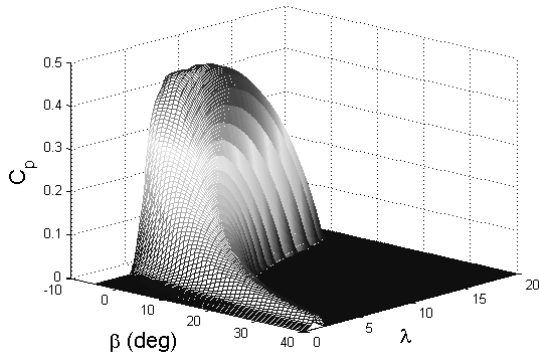


Fig. 1 Power coefficients

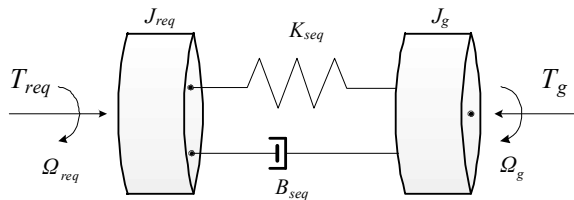


Fig. 2 2-mass model on the generator side

Table 1 Physical parameter values of a 2MW wind turbine

Physical parameters	Values
R	40 m
J_r	6.028e6 kgm ²
J_g	60 kgm ²
B_l	1.3e5 Nm/(rad/s)
K_l	1.068 Nm/(rad)
N_{gb}	83.33

$$J_{req} \dot{\Omega}_{req}(t) = T_{req}(t) - T_{sh}(t) \quad (3)$$

$$J_g \dot{\Omega}_g(t) = T_{sh}(t) - T_g(t) \quad (4)$$

$$T_{sh}(t) = K_{seq}(\theta_{req}(t) - \theta_g(t)) + B_{seq}(\Omega_{req}(t) - \Omega_g(t)) \quad (5)$$

여기서 J_{req} 는 로터의 등가 관성모멘트, B_{seq} 는 드라이브-트레인의 등가 감쇠, K_{seq} 는 드라이브-트레인의 등가 강성, T_{req} 는 등가의 공기역학적 토크이며 식 (6)과 식 (7)로 표현된다.

$$J_{req} = \frac{J_r}{N_{gb}^2}, \quad K_{seq} = \frac{K_l}{N_{gb}^2}, \quad B_{seq} = \frac{B_l}{N_{gb}^2} \quad (6)$$

$$T_{req}(t) = \frac{T_r(t)}{N_{gb}} \quad (7)$$

여기서 J_r 는 로터의 관성모멘트, J_g 는 발전기의 관성모멘트, T_g 는 발전기 토크, Ω_r 은 로터의 회전속도, Ω_g 는 발전기 회전속도, K_l 은 저속 회전축의 강성, B_l 은 저속 회전축의 감쇠, N_{gb} 는 기어박스의 기어비이다. 식 (5)를 이용하여 식 (3)과 식 (4)를 정리하면 식 (8)과 식 (9)와 같다.

$$J_{req} \dot{\Omega}_{req}(t) + B_{seq}(\Omega_{req}(t) - \Omega_g(t)) \quad (8)$$

$$+ K_{seq}(\theta_{req}(t) - \theta_g(t)) = T_{req}(t)$$

$$J_g \dot{\Omega}_g(t) + B_{seq}(\Omega_g(t) - \Omega_{req}(t)) \quad (9)$$

$$+ K_{seq}(\theta_g(t) - \theta_{req}(t)) = -T_g(t)$$

고려된 풍력터빈은 가변속도-가변피치 형태이고 정격출력은 2 MW, 로터의 정격속도는 18 rpm, 출력계수는 Fig. 1과 같다. 정격출력이 생산되는 정격풍속은 12 m/s이다. 2 MW 풍력터빈의 파라미터 값들은 Table 1과 같으며, 드라이브-트레인의 등가 감쇠 $B_{seq} = 18,725 \text{ Nm/(rad/s)}$ 이고 드라이브-트레인의 등가 강성 $K_{seq} = 1,5265e4 \text{ Nm/(rad)}$ 로 계산된다.

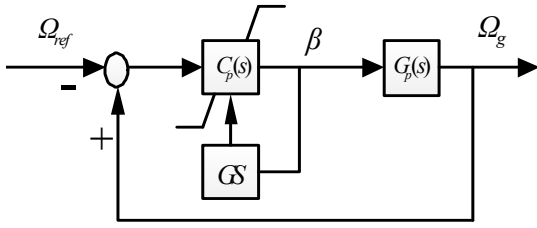


Fig. 3 Pitch control with gain-scheduling

3. 피치 제어기와 게인-스케줄링

3.1 피치 PI 제어기

본 논문에서 풍력터빈의 피치 제어기는 Fig. 3과 같은 속도제어루프 형태의 PI 제어기와 피치 게인-스케줄링(GS)을 사용하였으며, 피치 제어기는 발전기의 회전속도(Ω_g)를 피드백하여 기준입력인 발전기 정격회전속도(Ω_{ref})와의 오차를 PI 제어기를 통해 정격 풍속이상에서 피치각을 조절하는 방법이다. 피치 PI 제어기 설계 시에는 식 (10)의 1-질량 모델로 표현된 운동방정식을 이용한다. 1-질량 모델에서는 회전축의 강성과 감쇠는 고려하지 않고 기어박스의 기어비만 고려한다.

$$J_e \dot{\Omega}_g(t) = T_{req}(t) - T_g(t) \quad (10)$$

여기서 J_e 는 회전축에서의 등가 관성모멘트이고 식 (11)과 같다.

$$J_e = J_g + \frac{J_r}{N_{gb}^2} \quad (11)$$

공기역학적 토크(T_r)는 로터 속도, 풍속, 피치각에 대해 비선형적인 특성을 보이고 피치 제어기 설계를 위해서는 선형화가 필요하다. 선형화는 풍속에 따른 정상상태값들을 동작점($V_o, \Omega_{ro}, \beta_o$)으로 두고 동작점 근처에서의 변화를 고려한다. 발전기 속도에 대한 변화를 $\delta\Omega_g$, 발전기 토크에 대한 변화를 δT_g , 피치각의 변화를 $\delta\beta$ 로 두면 식 (10)의 운동방정식을 식 (12)와 같이 선형화된 운동방정식으로 표현할 수 있다.

$$J_e \delta \dot{\Omega}_g(t) + B_{\Omega_g} \delta \Omega_g(t) = N_{\beta_g} \delta \beta - \delta T_g(t) \quad (12)$$

$$B_{\Omega_g} = \frac{\partial T_r}{\partial \Omega_r} \frac{1}{N_{gb}^2} = \frac{\pi \rho R^2}{2} \frac{V_o^3}{\Omega_{ro}^2} \left[C_p(\lambda_o, \beta_o) - \lambda_o \frac{\partial C_p(\lambda, \beta_o)}{\partial \lambda} \right] \frac{1}{N_{gb}^2} \quad (13)$$

$$N_{\beta_g} = \frac{\partial T_r}{\partial \beta} \frac{1}{N_{gb}} = \frac{\pi \rho R^2}{2} \frac{V_o^3}{\Omega_{ro}^2} \frac{\partial C_p(\lambda_o, \beta)}{\partial \beta} \frac{1}{N_{gb}} \quad (14)$$

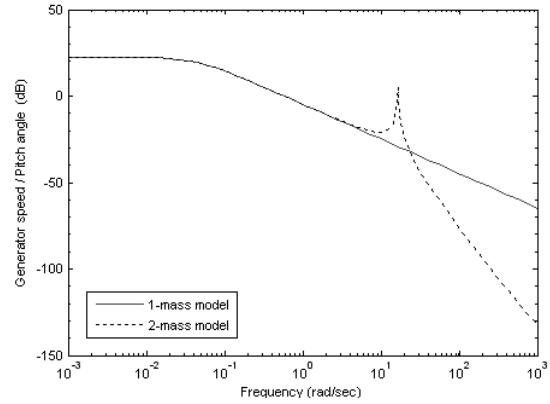


Fig. 4 Comparison of frequency responses of wind turbine

식 (13)과 식 (14)는 공기역학적 토크를 로터 속도와 피치각에 대해 선형화하여 발전기축의 값으로 표현한 것이다. 피치각에 대한 발전기 회전속도의 전달함수($G_p(s)$)는 식 (15)와 같고 피치 PI 제어기($C_p(s)$)는 식 (16)과 같다.

$$G_p(s) = \frac{\delta \Omega_g(s)}{\delta \beta(s)} = \frac{N_{\beta_g}}{J_e + B_{\Omega_g}} \quad (15)$$

$$C_p(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (16)$$

여기서 K_p 와 K_i 는 각각 피치 PI 제어기의 비례게인과 적분게인이다.

Fig. 4는 설계 풍속인 정격 풍속 12 m/s일 때의 1-질량 모델과 2-질량 모델을 각각 피치각에 대한 발전기 회전속도의 주파수 응답을 비교한 것이다. 2-질량 모델과 1-질량 모델은 약 10 rad/sec 이하에서 주파수 응답이 동일함을 확인할 수 있었다. 1-질량 모델을 이용한 페루프 피치계의 전달함수($G_{pc}(s)$)는 식 (17)과 같다.

$$G_{pc}(s) = \frac{\delta \Omega_g(s)}{\delta \Omega_{ref}(s)} = \frac{-N_{\beta_g} (K_p s + K_i)}{J_e s^2 + (B_{\Omega_g} - K_p N_{\beta_g}) s - K_i N_{\beta_g}} \quad (17)$$

그러므로 페루프 피치계의 고유진동수(w_n)와 감쇠비(ζ)는 각각 식 (18)과 식 (19)와 같다.

$$w_n = \sqrt{-\frac{K_i N_{\beta_g}}{J_e}} \quad (18)$$

$$\zeta = \frac{B_{\Omega_g} - K_p N_{\beta_g}}{2 \sqrt{J_e K_i N_{\beta_g}}} \quad (19)$$

3.2 피치 게인-스케줄링

식 (18)과 식 (19)를 보면 B_{Ω_y} 와 N_{β_y} 가 페루프 피치계의 고유진동수와 감쇠에 영향을 주는 것을 확인할 수 있다. 특히 N_{β_y} 는 페루프 피치계의 고유진동수에 큰 영향을 준다. Fig. 5는 풍속 변화에 따른 N_{β_y} 의 변화를 보여주는 것이다. N_{β_y} 는 풍속이 증가에 따라 절대값이 커지는 비선형적 특성을 보임을 확인할 수 있다. 이로 인해 풍력터빈의 피치제어 시 고정된 피치 PI 게인값을 사용하면 풍속이 커짐에 따라 N_{β_y} 의 증가로 인해 페루프 피치계의 고유진동수가 커져 응답속도가 빨라진다. 이러한 공기역학적 토크의 비선형적 특성 때문에 피치 게인-스케줄링이 필요하다.

풍속이 커짐에 따라 N_{β_y} 의 절대값이 커짐으로 피치 게인-스케줄링은 이의 영향을 줄이기 위해 고풍속 영역에서의 피치 PI 게인값을 작게 사용하는 방법인데, 피치 게인-스케줄링은 피치각이 커짐에 따라 설계된 피치 PI 게인값을 게인제수(gain divisor)로 나누도록 하였고, 게인제수는 Fig. 6과 같이 피치각을 이용하여 구현하였다.

피치 PI 제어기는 풍속 12 m/s에 대하여 설계하였으며 비례게인(K_p)은 3.22, 적분게인(K_i)은 2.96을 사용하였다. 페루프 피치계의 풍속 변화에 따른 고유진동수 변화를 확인해 보면 Fig. 7과 같다. 피치 게인-스케줄링을 사용하지 않으면 페루프 피치계의 고유진동수가 고풍속 영역(20 m/s 이상)에서 약 0.5 Hz 이상 커져 설계풍속(12 m/s)에서의 페루프 피치계의 고유진동수 값보다 2.6배 이상 증가한 것을 확인할

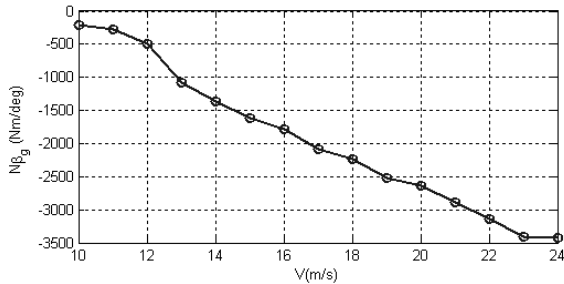


Fig. 5 Variation of nonlinear parameter value of N_{β_y}

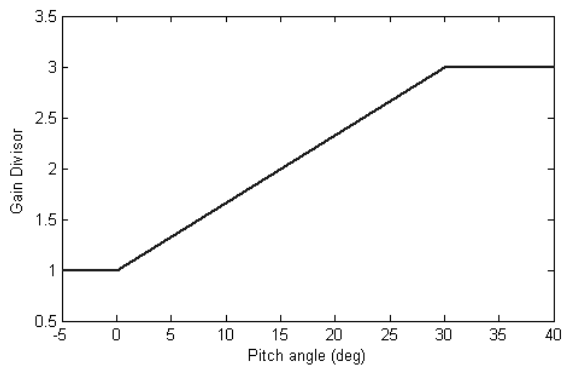


Fig. 6 Gain divisor for pitch gain-scheduling

수 있다. 피치 게인-스케줄링을 사용하면 페루프 피치계의 고유진동수는 고풍속 영역(20 m/s 이상)에서 설계풍속(12 m/s)에서의 페루프 피치계의 고유진동수 값보다 약 1.6배 정도 커진 0.33 Hz인 것을 확인할 수 있다. 피치 게인-스케줄링으로 인해 고풍속 영역(20 m/s 이상)에서 페루프 피치계의 고유진동수가 감소됨을 확인할 수 있다.

4. 수치실험 결과

정격출력이 2 MW인 풍력터빈에 대한 2-질량 모델을 Matlab/Simulink로 구현하였다. 고려된 풍력터빈의 발전기 정격속도는 1,500 rpm이고 발전기 정격토크는 13.4 kNm이다. 정격 풍속(12 m/s) 이상에서 발전기의 토크 크기는 정격값을 내도록 하였다. 계단풍속에 대해서 피치 게인-스케줄링을 사용하지 않는 경우와 피치 게인-스케줄링을 사용한 경우의 응답을 수치실험을 통해 비교 확인하였다.

풍속변화에 대한 피치 제어기의 응답특성을 확인하기 위하여 계단풍속 입력을 사용하였다. 계단풍속은 10 m/s에서 25 m/s까지 20초 간격으로 3 m/s씩 커지는 경우를 고려하였다. 계단 풍속에 대한 피치각(β), 발전기 회전속도(Ω_y), 발전기 토크(T_g), 출력파워(P)의 응답은 Fig. 7과 같고, 축 토크

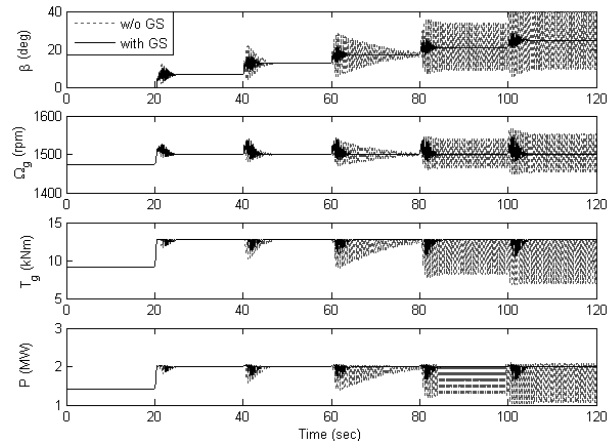


Fig. 7 Responses to step wind speed

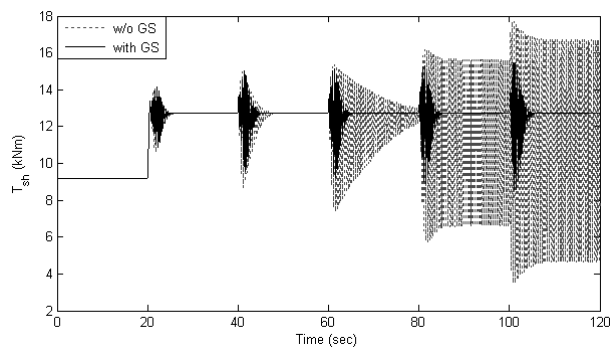


Fig. 8 Responses to step wind speed

(T_{sh})는 Fig. 8과 같다. 피치 게인-스케줄링을 사용하지 않으면 고폭속 영역(20 m/s 이상)에서 드라이브-트레인 모드의 진동이 크게 발생하는 불안정한 특성을 보여, 출력파위에 나쁜 영향을 줄 뿐만 아니라 축 토크의 진동 폭을 크게 하여 드라이브-트레인의 축 및 기어박스의 동적 응답에 나쁜 영향을 미침을 확인할 수 있다. 그러나 피치 게인-스케줄링을 사용하면 고폭속 영역에서 드라이브-트레인 모드의 진동에 의한 불안정성을 제거하여 출력파위 및 축 토크가 안정화되는 것을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 2 MW 풍력터빈을 대상으로 드라이브-트레인의 진동모드를 고려한 2-질량 모델에 대하여 공기역학적 토크의 비선형성이 풍력터빈의 진동 모드의 응답에 미치는 피치 게인-스케줄링의 영향을 계단풍속 응답을 통하여 확인하였다. 비선형적인 공기역학적 토크에 대한 선형화 해석을 통하여 페루프 피치계의 고유진동수를 구함으로 풍력터빈의 피치제어가 공기역학적 토크의 비선형적 특성에 큰 영향을 받음을 확인하였다. 풍속이 커짐에 따라 페루프 피치계의 고유진동수가 고폭속 영역(20 m/s 이상)에서 설계 풍속인 정격 풍속에서의 고유진동수보다 2.6배 이상 커짐을 확인할 수 있었다. 이로 인해 피치 게인-스케줄링을 사용하지 않는 경우 고폭속 영역에서 피치 응답이 매우 빨라지고 피치 각, 발전기 회전속도, 발전기 토크, 출력파위 및 축 토크의 응답에 드라이브-트레인 진동모드의 영향이 커져 불안정한 응답이 발생함을 확인하였다. 그러나 피치 게인-스케줄링을 사용하면 고폭속 영역에서 페루프 피치계의 고유진동수를 작게 하여 드라이브-트레인 진동모드에 대한 피치제어의 영향이 줄어 고폭속 영역에서의 피치 응답을 안정화할 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2011년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업의 지원(No. 2011-0004862)과, 2011(3

차년도)년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원(No. 20093021020030)을 받아 수행한 연구과제입니다.

참고문헌

- (1) Hansen, A. D. and Hansen, L. H., 2007, "Wind Turbine Concept Market Penetration over 10 Years," *Wind Energy*, Vol. 10, No. 1, pp. 81~97.
- (2) Joselin Herberta, G. M., Iniyamb, S., Sreevalsanc, E. and Rajapandian, S., 2007, "A Review of Wind Energy Technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 11, pp. 1117~1145.
- (3) Bianchi, F. D., Battista, H. D. and Mantz, R. J., 2007, "Wind turbine control systems: principles, modelling and gain scheduling design," Springer-Verlag.
- (4) Munteanu, I., Bratcu, A. L., Cutululis, N. A. and Ceanga, E., 2008, "Optimal Control of Wind Energy Systems," Springer-Verlag.
- (5) Lim, C. W., 2011, "Study on Properties of Pitch Control for Wind Turbine," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 35, No. 1, pp. 59~65.
- (6) Van der Hooft, E. L., Schaak, P. and T. G. Van Engelen, T. G., 2003, *Wind Turbine Control Algorithms*, Technical report ECN-C-03-111, ECN Petten.
- (7) Hansen, M., Hansen, A., Larsen, T., Øye, S., Sørensen, P. and Fuglsang, P., 2005, "Control Design for a Pitch-regulated, Variable Speed Wind Turbine," Technical Report RISO-R-1500(EN), Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark.
- (8) Bianchi, F. D., Mantz, R. J. and C. F. Christiansen, C. F., 2005, "Gain Scheduling Control of Variable-Speed Wind Energy Conversion Systems Using Quasi-LPV Models," *Control Engineering Practice*, Vol. 13, pp. 247~255.
- (9) Munteanu, I., Cutululis, N. A., Bratcu, A. I. and Ceangă, E., 2005, "Optimization of Variable Speed Wind Power Systems Based on a LQG Approach," *Control Engineering Practice*, Vol. 13, pp. 903~912.