

Bladed S/W를 이용한 2MW급 풍력터빈에 대한 피치 PI 제어기의 계단응답 고찰

임채욱*†

An Investigation on Step Responses of Pitch PI Controller for a 2MW Wind Turbine Using Bladed S/W

Chae Wook Lim*†

Key Words : Wind turbine(풍력 터빈), Pitch controller(피치 제어기), PI controller(PI 제어기), Blades S/W, Fixed-gain(고정 게인), Gain-scheduling(게인-스케줄링), Step response(계단 응답)

ABSTRACT

The pitch control system in wind turbines becomes more and more important as the wind turbines are larger in multi-MW size. PI controller has been applied in most pitch controllers and it has been known that gain-scheduling is essential for pitch control of wind turbines. A demo model of 2 MW wind turbine which represents the whole dynamics of wind turbine including dynamic behaviors of blade, tower and rotational shaft is given in the commercial Bladed S/W for real wind turbines. In this paper, some results on step responses of the pitch PI controller and effectiveness of gain-scheduled pitch PI controller are presented through the Bladed S/W for the 2 MW wind turbine.

1. 서론

오늘날 대부분의 풍력터빈은 페더링 방향의 피치제어 방식인 가변속도-가변피치 형태를 취하고 있다. 최근 풍력터빈은 지속적으로 대형화되는 추세로 수 MW급이 시장의 주류를 형성하고 있다^(1,2). 피치각 제어 방식의 채택으로 풍속 변화에 대하여 효율적인 운전이 가능하고 비상시 안전 대비 능력이 우수한 장점을 가지게 되었다. 최근 풍력터빈이 대형화됨에 따라 블레이드의 피치각을 제어하는 피치 제어기의 중요성이 더욱 증대되고 있다.

피치 제어기는 PI 제어기가 많이 사용되고 있는데, 실제 풍력터빈 시스템에서 피치 PI 제어 게인의 스케줄링은 필연적으로 사용된다^(3,4). 피치 게인-스케줄링을 사용하는 주된 이유들은 공력 토크가 풍속에 따라 비선형적인 특징을 보이는 점과 드라이버-트레인(블레이드, 타워, 회전축 등)의 동적 특성을 피치 제어기의 설계 시에 모두 고려하기 어려운

점 등을 들 수 있다. 피치 PI 제어기의 목적은 정격이상에서의 출력을 정격으로 유지하는 것이므로, 실제 풍력터빈 시스템에서는 드라이버-트레인의 강성과 감쇠를 무시한 1-질량 모델에 대하여 피치 PI 제어기를 설계한다.

이전 연구들에서는 1-질량 모델을 대상으로 공력 토크의 비선형성이 피치 제어기에 미치는 영향⁽⁵⁾과 피치 PI 제어기의 게인-스케줄링 방법과 난류 응답⁽⁶⁾에 대한 결과 등을 제시하였다. 또한 드라이버-트레인의 진동모드 하나만을 고려한 2-질량을 대상으로 피치 PI 제어기가 고품속에서 출력 파워에 미치는 영향을 난류풍속을 이용하여 확인하였다⁽⁷⁾. 그러나 풍력터빈 시스템은 블레이드, 로터, 회전축, 기어박스, 타워, 발전기 시스템, 피치 시스템, 요 시스템 등의 구성 요소들이 있는데, 풍력터빈 시스템의 전체 구성요소들의 동적 거동을 모두 고려하여 풍속에 따른 응답을 확인하는 것이 반드시 필요하다.

본 연구에서는 1-질량 모델을 대상으로 설계한 피치 PI

* 한밭대학교 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University)

† 교신저자(Corresponding Author), E-mail : cwlim@hanbat.ac.kr

Table 1 Physical parameter values of a 2MW wind turbine model

물리적 파라미터	값
블레이드 길이 (R)	40 [m]
로터 관성 모멘트 (J_r)	6.209e6 [kgm^2]
발전기 관성 모멘트 (J_g)	60 [kgm^2]
기어박스 증속비 (n_{gb})	83.33

Table 2 Rated parameter values of a 2MW wind turbine model

정격 파라미터	값
발전기 정격 속도	1500 [rpm]
발전기 정격 토크	13.4 [kNm]
정격 풍속	11.7 [m/s]
정격 출력 파워	2 [MW]

제어기를 드라이버-트레인(블레이드, 타워, 회전축 등)의 동적 특성이 모두 고려된 고차 시스템의 모델에 적용했을 때의 응답 특성을 확인하고자 한다. 이를 위해 실제 풍력터빈 시스템의 전체 거동을 묘사할 수 있고 신뢰성이 입증된 상용 S/W들 중 Bladed S/W⁽⁸⁾를 이용하여 정격 이상의 풍속에 대하여 피치 PI 제어기의 응답을 살펴보고자 한다. 수치실험에서는 2 MW 풍력터빈을 대상으로 계단풍속 입력에 대한 발전기 회전속도, 출력 파워, 블레이드 피치각과 발전기 토크의 응답을 살펴본다. 고정된 피치 PI 제어기 계인을 사용할 때 계인값에 따른 계단응답과 피치 PI 제어기의 계인-스케줄링을 적용했을 때의 계단응답에 대한 수치실험 결과를 확인하고 고찰한다.

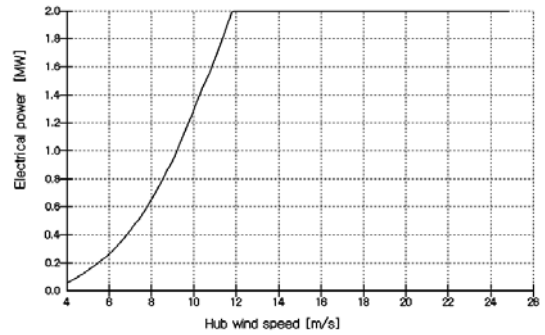
2. 2MW 풍력터빈 모델

2.1. 모델 파라미터

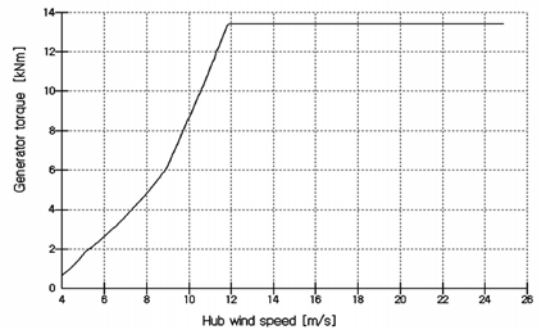
GL Garrad Hassan의 Bladed S/W에서는 2 MW 풍력터빈 데모 모델을 제공하고 있다⁽⁸⁾. Bladed S/W에서는 블레이드, 로터, 타워, 파워 트레인 등 풍력터빈의 각 구성요소들을 표현할 수 있는 창들이 있는데, 거기에서 제시된 2 MW 풍력터빈 데모 모델의 물리적인 파라미터값들을 정리하면 Table 1과 같다.

2.2. 정상상태 특성

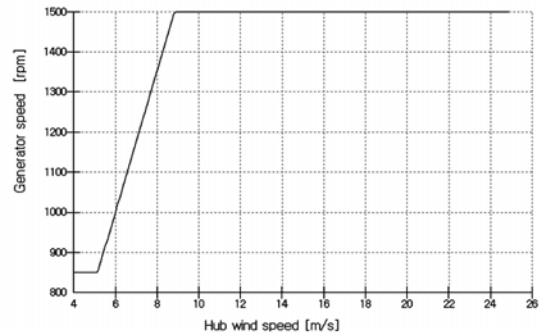
2 MW 풍력터빈 데모 모델의 정격 파라미터값들은 Table 2와 같다. Bladed S/W에서는 “Steady Power Curve”를 클릭하면 풍력터빈의 정상상태 곡선을 계산하여 구해 주는데, 풍속에 따른 출력되는 전기 파워, 발전기 토크, 발전기 속도, 피치각의 정상상태 값들은 Fig. 1에서 각각 보여주고 있다.



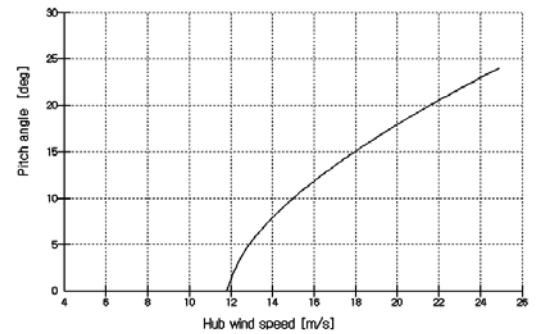
(a) Electrical power



(b) Generator torque



(c) Generator speed



(d) Pitch angle

Fig. 1 Steady state curves

정격풍속은 11.7 m/s이고 정격풍속 이하에서의 피치각은 0도이며 정격풍속 이상에서는 풍속이 커질수록 피치각이 커짐을 확인할 수 있다.

3. 풍력터빈의 피치제어기

바람에 의해 발생하는 풍력터빈의 공기역학적 토크는 식 (1)과 같이 표현되는데, 풍속 뿐만 아니라 주속비와 피치각에 대하여 비선형적으로 표현된다.

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

여기서 ρ 는 공기밀도, R 은 블레이드 길이, β 는 블레이드 피치각, V 는 풍속, C_p 는 출력계수, λ 는 주속비이다.

실제 풍력터빈 시스템에서는 드라이버-트레인(블레이드, 타워, 회전축 등)의 동적 특성이 나타나지만, 피치 제어기의 설계에 있어서는 기어박스의 증속비는 고려하나 드라이버-트레인의 강성과 감쇠를 무시한 1-질량 모델에 대하여 설계한다. 피치 제어기의 설계 시에 고려되지 않은 진동모드는 토크 제어기에서 드라이버-트레인 댐퍼를 통해 감쇠를 더해 준다. 피치제어를 위한 되먹임 신호는 발전기의 회전속도를 사용한다. 발전기 회전속도를 상태로 둔 1-질량 운동 방정식은 식 (2)와 같이 1차 미분 방정식으로 표현된다.

$$J_{eq} \dot{\Omega}_g(t) + B_{eq} \Omega_g(t) = \frac{T_r(t)}{n_{gb}} - T_g(t) \quad (2)$$

여기서 Ω_g 는 발전기 회전속도, J_{eq} 는 등가 관성 모멘트, B_{eq} 는 등가 감쇠 계수이다.

피치 제어기는 발전기의 회전속도를 되먹임하여 기준입력인 발전기의 정격 회전속도와의 오차를 피치 PI 제어기를 통해 블레이드 피치각을 조절하는 방법이다. 피치 제어기는 공기역학적 토크의 비선형성으로 인해 풍속의 크기에 따라 비선형적인 특성을 보인다. 그러므로 피치 PI 제어기는 게인-스케줄링이 필수적이다. 공기역학적 토크를 피치각에 대하여 편미분한 후 피치각 변화에 대한 발전기 회전속도 응답 사이의 선형화된 1-질량 모델의 전달함수를 구하면 식 (3)과 같다.

$$G_p(s) = \frac{\delta \Omega_g(s)}{\delta \beta(s)} = \frac{N_{g,\beta}}{J_{eq}s + B_{eq}} \quad (3)$$

여기서 $N_{g,\beta}$ 는 공기역학적 토크의 피치각 비선형 파라미터로 식 (4)와 같이 정의된다.

$$N_{g,\beta} = \frac{\partial T_r}{\partial \beta} \cdot \frac{1}{n_{gb}} \quad (4)$$

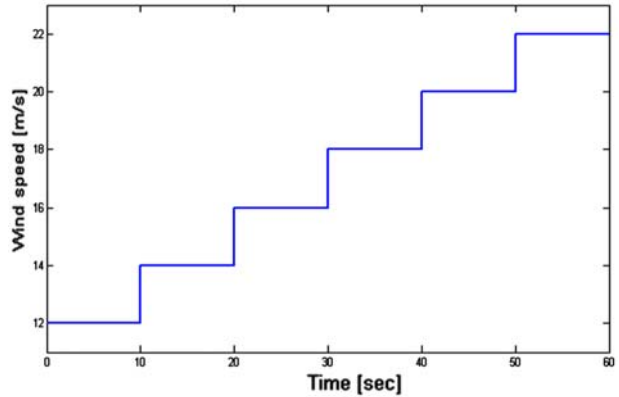


Fig. 2 Simulated step wind speed

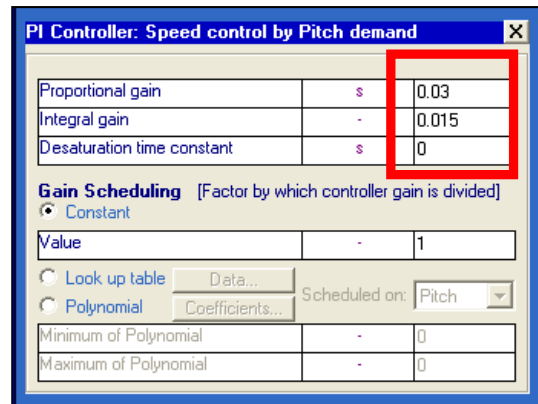


Fig. 3 Parameter setting for fixed pitch PI gain in Bladed

피치 제어기($PC_{sys}(s)$)는 블레이드 피치각 조절을 위하여 비례게인(K_p)과 적분게인(K_i)으로 이루어진 피치 PI 제어기에 게인-스케줄링(GS)을 적용한 형태로 식 (5)와 같다.

$$PC_{sys}(s) = GS \cdot C_p(s) = GS \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \quad (5)$$

4. 피치 PI 제어기의 계단응답

Bladed S/W의 수치실험에서 사용한 풍속은 Fig. 2와 같이 정격 이상에서 12 m/s에서 22 m/s까지 10초간 2 m/s씩 증가하는 계단입력이다. 피치 제어기를 통해 풍력터빈 응답의 불안정성을 확인하기 위해서는 난류 풍속보다는 계단 풍속 입력이 더 유용하다.

4.1. 고정된 피치 PI 제어기 게인에 따른 계단응답

우선 풍속에 상관없이 고정된 게인값을 가지는 피치 PI 제어기를 적용한 경우의 응답에 대하여 살펴보고자 한다. 설계된 게인값은 $K_p=0.03$ 이고 $K_i=0.015$ 이다. Bladed S/W에서 피치 PI 제어기의 설정은 Fig. 3과 같다. 설계된 게인값은

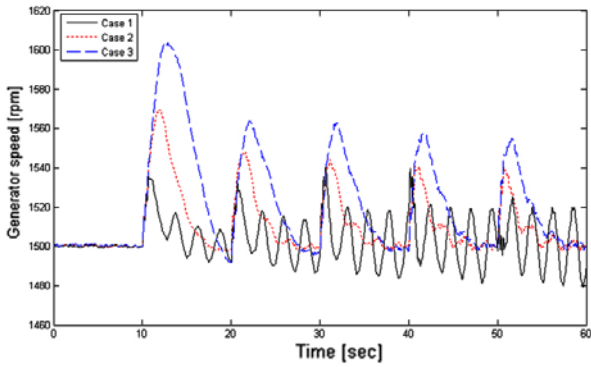


Fig. 4 Comparison of generator speeds for fixed pitch PI controller

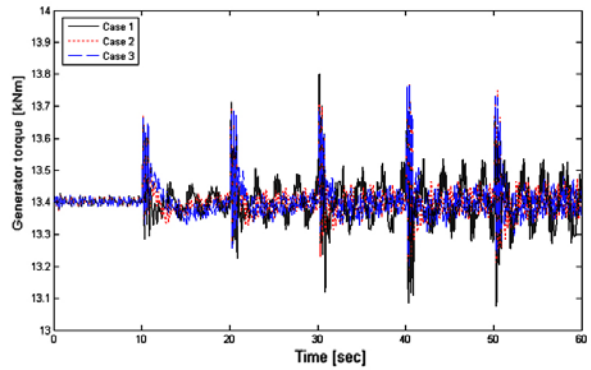


Fig. 7 Comparison of generator torques for fixed pitch PI controller

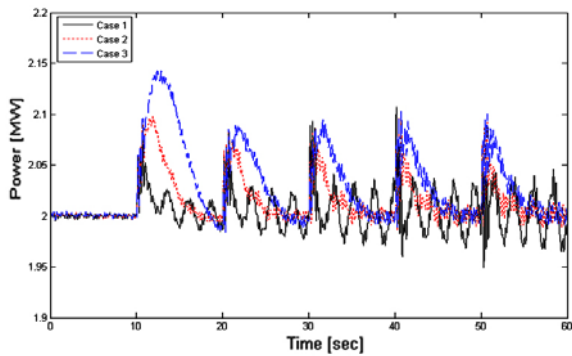


Fig. 5 Comparison of powers for fixed pitch PI controller

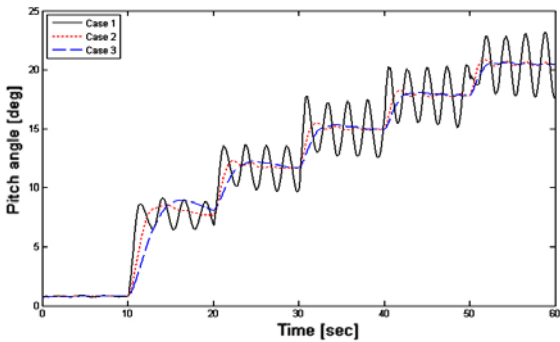


Fig. 6 Comparison of pitch angles for fixed pitch PI controller

1차 시스템에 대한 모델에 대하여 응답특성이 좋도록 설계한 것이다. 그러나 실제 풍력터빈 시스템은 드라이버-트레인의 동특성이 나타나는 고차 시스템이므로 이에 대한 응답특성을 확인할 필요가 있다. 설계된 게인값(Case 1)을 적용한 경우와 게인값을 설계치보다 1/3배 줄인 경우(Case 2)와 1/6배로 줄인 경우(Case 3)에 대한 Bladed S/W에서의 응답(발전기 회전속도, 출력 파워, 블레이드 피치각, 발전기 토크) 특성은 Fig. 4~Fig. 7에서 비교하여 보여주고 있다. 정격풍속 근처의 초기 10~20초 구간에서는 Case 1의 경우 게인값이 커서 발전기의 회전속도의 응답이 빠르고 출력파워가 정격에 빨리 도달하지만, 풍속이 커질수록 드라이버-트레인의

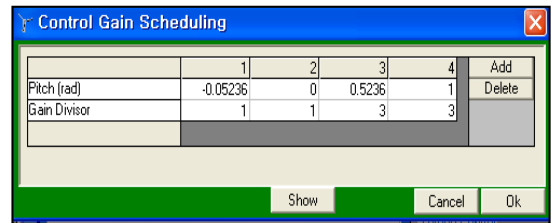


Fig. 8 Parameter setting for pitch PI gain scheduling in Bladed

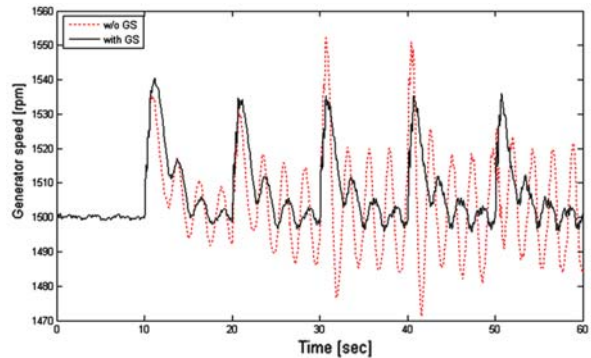


Fig. 9 Comparison of generator speeds for pitch PI controller with gain-scheduling

주파수 진동의 영향이 발전기 회전속도, 출력 파워, 피치각과 발전기 토크 모두에 더 크게 일어남을 확인할 수 있다. 드라이버-트레인의 주파수 진동의 영향이 이들 응답에 미치는 영향을 줄이기 위하여 게인값을 작게 사용한 Case 2와 Case 3의 응답을 보면, 게인값을 줄일수록 드라이버-트레인의 주파수 진동은 줄어들지만 발전기 회전속도와 출력파워의 응답이 더 느려지는 것을 확인할 수 있다.

4.2. 피치 PI 제어기의 게인-스케줄링 계단응답

다음으로 피치 PI 제어기의 게인-스케줄링에 따른 계단 응답을 살펴보고자 한다. 게인-스케줄링은 피치각이 커짐에 따라 피치 PI 제어기의 게인값은 작아지도록 설계하였고,

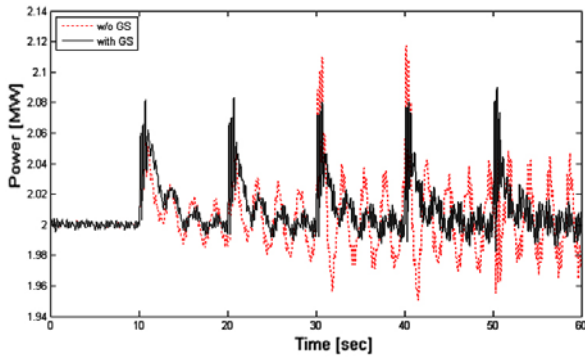


Fig. 10 Comparison of powers for pitch PI controller with gain-scheduling

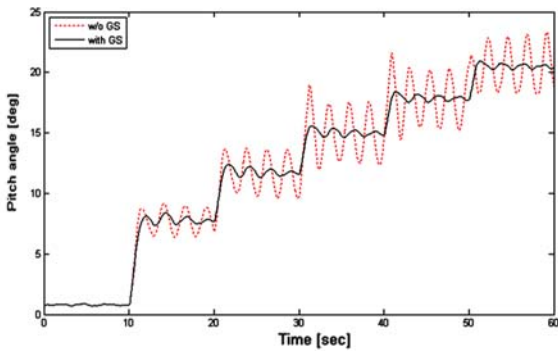


Fig. 11 Comparison of pitch angles for pitch PI controller with gain-scheduling

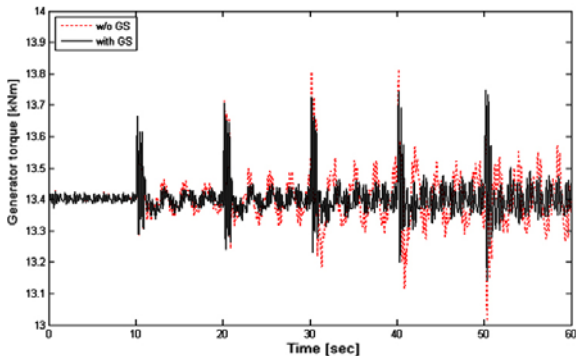


Fig. 12 Comparison of generator torques for pitch PI controller with gain-scheduling

Bladed S/W에서 피치 PI 제어기의 계인-스케줄링 설정은 Fig. 8과 같다. 설계된 계인값 Case 1($K_p=0.03$, $K_i=0.015$)에 대하여 고정된 계인값을 적용한 경우와 계인-스케줄링을 적용한 경우의 Bladed S/W에서의 응답(발전기 회전속도, 출력 파워, 블레이드 피치각, 발전기 토크) 특성을 비교하면 Fig. 9~Fig. 12와 같다. 피치 PI 제어기에서 계인-스케줄링을 사용하면 풍속이 커지더라도 드라이버-트레인의 주파수 진동의 영향이 발전기 회전속도, 출력 파워, 피치각과 발전

기 토크 모두에서 감소됨을 확인할 수 있다. 그러므로 실제 풍력터빈 시스템의 피치 PI 제어기에 있어서 계인-스케줄링은 필요하며 발전기 회전속도와 출력파워의 응답도 빠르게 할 수 있고 동시에 드라이버-트레인의 주파수 진동을 줄일 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 2 MW 풍력터빈 시스템을 대상으로 피치 PI 제어기의 계단풍속에 대한 발전기 회전속도, 출력 파워, 블레이드 피치각과 발전기 토크의 응답특성을 상용 Bladed S/W를 이용하여 살펴보았다. 피치 PI 제어기는 드라이버-트레인(블레이드, 타워, 회전축 등)의 진동모드를 무시한 1-질량 모델에 대하여 설계하므로, 실제 풍력터빈 시스템의 드라이버-트레인의 동적 특성이 표현된 Bladed S/W를 통하여 응답특성을 고찰해 보았다. 고정된 피치 PI 제어기의 경우 계인값이 커질수록 발전기 회전속도와 출력파워의 응답은 빨라지나 풍속이 커질수록 드라이버-트레인의 주파수 진동의 영향이 더 커지고, 계인값이 작아질수록 드라이버-트레인의 주파수 진동의 영향은 줄어으나 발전기 회전속도와 출력파워의 응답은 느려지는 문제가 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 피치 PI 제어기에 계인-스케줄링을 적용하는 경우 어느 정도 큰 계인값을 적용할 수 있어서 발전기 회전속도와 출력파워의 응답을 빠르게 할 수 있고 또한 풍속이 커지더라도 드라이버-트레인의 주파수 진동을 줄일 수 있음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2014년도 한밭대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구 결과입니다.

References

- (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) Bossanyi, E. A., 2000, "The Design of Closed-loop Controllers for Wind Turbines," Wind Energy, Vol. 3, pp. 149~163.
- (4) Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. and Bossanyi, E., 2001, "Wind Energy Handbook," John Wiley & Sons, Ltd.
- (5) Lim, C. W., 2011, "Study on Properties of Pitch Control

임채욱

- for Wind Turbine," Transaction of the KSME(A), Vol. 35, No. 1, pp. 59~65.
- (6) Lim, C. W. and Jo J. C., 2010, "An Investigation on Responses of Pitch PI Gain-Scheduling for Wind Turbine According to Feedback Signal," Journal of Wind Energy, Vol. 1, No. 2, pp. 59~64.
- (7) Lim, C. W. and Jo J. C., 2012, "An Effect of Pitch Gain-Scheduling on Shaft Vibration Response of Wind Turbine," Journal of Fluid Machinery, Vol. 15, No. 2, pp. 36~40.
- (8) Bossanyi, E. A., 2009, GH Bladed Version 3.82 User Manual.