

풍력 발전기 피치 제어를 위한 퍼지 PI 제어기 A Fuzzy PI Controller for Pitch Control of Wind Turbine

천종민^{1,2} · 김진욱¹ · 김홍주¹ · 최영규² · 김무림^{3*}

Jongmin Cheon, Jinwook Kim, Hongju Kim, Youngkiu Choi and Maolin Jin

Received: 04 Nov. 2017, Revised: 08 Dec. 2017, Accepted: 20 Feb. 2018

Key Words : Wind Turbine (풍력발전기), Pitch Control (피치 제어), Fuzzy Control (퍼지 제어), Discrete PI Control (이산 PI 제어), Discrete Fuzzy PI Control (이산 퍼지 PI 제어)

Abstract: When the wind speed rises above the rated wind speed, the produced power of the wind turbines exceeds the rated power. Even more, the excessive power results in the undesirable mechanical load and fatigue. A solution to this problem is pitch control of the wind turbines. This paper presents a systematic design method of a collective pitch controller for the wind turbines using a discrete fuzzy Proportional-Integral (PI) controller. Unlike conventional PI controllers, the fuzzy PI controller has variable gains according to its input variables. Generally, tuning the parameters of fuzzy PI controller is complex due to the presence of too many parameters strongly coupled. In this paper, a systematic method for the fuzzy PI controller is presented. First, we show the fact that the fuzzy PI controller is a superset of the PI controller in the discrete-time domain and the initial parameters of the fuzzy PI controller is selected by using this relationship. Second, for simplicity of the design, we use only four rules to construct nonlinear fuzzy control surface. The tuning parameters of the proposed fuzzy PI controller are also obtained by the aforementioned relationship between the PI controller and the fuzzy PI controller. As a result, unlike the PI controller, the proposed fuzzy PI controller has variable gains which allow the pitch control system to operate in broader operating regions. The effectiveness of the proposed controller is verified with computer simulations using FAST, a NREL's primary computer-aided engineering tool for horizontal axis wind turbines.

1. 서 론

최근 들어 풍력, 태양광 등을 이용한 재생가능 에너지의 이용률이 증가하고 있다. 그 중에서도 바람 자원은 무한하고, 오염의 소지가 없고, 어디서나 구

할 수 있기 때문에 풍력 발전기에 관하여 많은 연구가 진행되어왔다.¹⁻¹⁴⁾ 풍력 발전기는 무한한 바람 자원을 이용하여 전기를 생산하는 발전 장치이다. 풍력 발전기 제작사들은 더욱 많은 전기를 생산하기 위해 풍력 발전기의 크기와 용량을 키우고 있으며 내륙보다는 강한 바람을 얻을 수 있는 연안에 풍력 발전기를 설치하고 있다. 이러한 풍력 발전기의 크기 및 용량 증가, 강한 바람 등은 풍력 발전기에 가해지는 기계적 하중과 피로도를 증가시켜 수명을 단축시키고, 유지 보수의 빈도를 증가시킬 수 있다.⁷⁾

풍력 발전기 발전량을 극대화하면서도 안전한 영역에서 운전하려면 이러한 위험 요소들로부터 보호하기 위한 운영 전략이 필요하다. 일반적으로 풍력 발전기의 출력 곡선은 그림 1과 같이 풍속에 따라

* Corresponding author: mulimkim@kero.re.kr

1 Korea Electrotechnology Research Institute (KERI), 12, Bulmosan-ro 10, Seongsan-gu, Changwon-si, 51543, Korea.

2 Dept. of Electrical Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea.

3 Korea Institute of Robot and Convergence (KIRO), 39 Jigok-ro, Nam-gu, Pohang-si, 37666, Korea.

Copyright © 2018, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

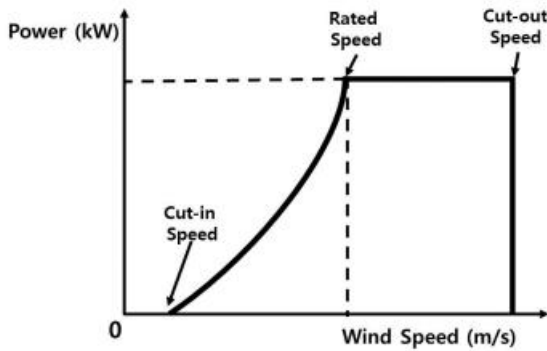


Fig. 1 Output power curve of wind turbine

크게 ‘정격 풍속 이하 영역’과 ‘정격 풍속 이상 영역’으로 나눌 수 있다. 풍력 발전기는 ‘정격 풍속 이하 영역’에서 최대의 전력을 생산하기 위해 토크 제어 모드로 동작한다. 반면에, ‘정격 풍속 이상 영역’에서는 생산되는 전력이 정격 전력을 넘지 않도록 하는 것을 목표로 동작한다. 이는 강한 풍속에서 풍력 발전기가 받는 기계적인 하중과 피로도를 줄이기 위한 것이고, 그 방법 중 하나가 피치 제어이다.

피치 제어에는 두 가지 방법이 있는데 하나는 통합 피치 제어이고, 다른 하나는 개별 피치 제어이다. 본 논문에서는 통합 피치 제어를 위한 알고리즘을 제안한다. 지금까지 피치 제어 알고리즘에 대해서 많은 연구가 수행되어 왔다.^{1,5-14)} 예를 들면, T. Senjyu 등은 제어가 모든 동작 영역에서 동작할 수 있도록 일반화된 예측 제어 방법을 이용한 피치 제어를 제안하였고¹⁾, J. Cheon 등은 외란 적응 제어를 이용한 개별 피치 제어 알고리즘을 제안하였다.⁷⁾ 그리고 많은 논문과 저서에서 PID 제어 또는 이득 스케줄링 방법 등을 이용한 변형된 PID 제어 기반의 피치 제어 알고리즘을 제안하였다^{6,11)}. 그러나 일반적인 PID 제어기는 선형 제어기이므로 제어 대상이 비선형성이 강하거나 외란 또는 파라미터의 불확실성이 존재하면 좋은 제어 성능을 보여주지 못하는 경우가 발생한다.^{15,16)} 또한, 일반적으로 PID 제어기는 하나의 동작점에 대해 설계되므로 고려되지 않은 동작점에서의 성능은 보장되지 않는다.

본 논문에서는 이산 퍼지 PI 제어기를 이용한 피치 제어기를 제안한다. 퍼지 시스템은 인간의 언어나 표현과 같이 수학적으로 표현하기 어려운 정성적인 요소를 공학에 활용하기 위한 방법론이다. 수학적으로도 범용 근사가 가능하다는 것이 증명됨으로써, 비선형 시스템 모델링이나 제어기로 많이 활용되고 있다.^{6,15)}

일반 PI 제어기와 제어 방식이 유사한 퍼지 제어

기를 퍼지 PI 제어기라고 하며, 특히, 이산 퍼지 PI 제어기는 최소 연산자를 AND 연산자로 사용하고, 중앙 평균 비퍼지화기를 사용하면 입력에 따라 제어 이득이 변하는 가변 이득 PI 제어기의 특성을 보인다.¹⁵⁾ 하지만, 퍼지 제어기는 조정해야 할 파라미터의 수가 많아서 최적의 제어 성능을 확보하기 위해 많은 시행착오가 필요하다. 예를 들어, 입력 변수가 n 개, 각 입력 변수에 따른 퍼지 집합의 수가 m 개이면 m^n 개의 퍼지 IF-THEN 규칙을 선정해야 한다. 각 규칙의 결론부에 p 개의 파라미터가 있으면 총 $p \times m^n$ 개의 파라미터를 조정해야 한다.

본 논문에서는 풍력발전기의 피치 제어를 위하여 보다 쉽고 체계적인 퍼지 PI 제어기 설계 방법을 제안한다. 먼저 일반적인 이산 PI 제어기가 수학적으로 이산 퍼지 PI 제어기의 특수한 경우라는 것을 보이고, 이산 PI 제어기 이득을 이용하여 이산 퍼지 PI 제어기의 파라미터의 초기 값을 선정하는 방법을 제안한다. 그 다음 퍼지 파라미터를 쉽고 체계적으로 결정하기 위해, 퍼지 IF-THEN 규칙의 수는 4개로 최소화하고 퍼지 파라미터를 결정하는 관계식을 제안하였다. 마지막으로 특정한 퍼지 규칙에 대해 결론부 파라미터를 조절하여 비선형 제어 표면을 추가적으로 조정하였다. 그 결과 본 논문에서 제안한 제어기는 조정이 쉽고 체계적이며 PI 제어기에 비해 우수한 제어 성능을 보였다. 본 논문에서 제안한 제어기는 MATLAB/Simulink를 이용한 시뮬레이션 환경에서 미국 NREL(National Renewable Energy Laboratory)의 FAST (Fatigue, Aerodynamics, Structures, and Turbulence) 엔지니어링 소프트웨어 툴을 활용하여, NREL에서 제공하는 5MW 풍력 발전기 모델에 적용하여 그 우수성을 확인하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 풍력 발전기의 수학적 모델을 소개하고, 3장에서는 이산 PI 제어기와 이산 퍼지 PI 제어기의 관계를 이용한 이산 퍼지 PI 제어기의 파라미터 선정 방법을 소개한다. 4장에서는 이산 퍼지 PI 제어기를 풍력 발전기의 피치 제어에 적용한 결과를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 보인다. 5장에서는 내용 및 시뮬레이션 결과를 요약한다.

2. 풍력 발전기

이 장에서는 풍력 발전기의 수학적 모델을 도출하고, 그로부터 풍력 발전기의 특성 및 피치 제어와 발

전 출력과의 관계를 살펴본다. 또한, 피치 제어는 결국 풍력 발전기 회전 날개의 각속도 제어임을 보이 고자 한다.

풍력 발전기가 바람으로부터 회수 할 수 있는 출 력 P_a 는 다음과 같다.

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

여기서 ρ 는 공기 밀도, R 은 회전 날개의 회전 반 경, $C_p(\lambda, \beta)$ 는 출력 계수, V_w 는 풍속이다. 출력 계수 $C_p(\lambda, \beta)$ 는 회전 날개의 각 β 와 선단 속도비 λ 에 의 해 결정된다. 선단 속도비는 다음과 같다.

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{V_w} \quad (2)$$

(2)에서 ω_r 은 회전 날개의 각속도이고, $\omega_r R$ 은 선단 선속도를 의미한다. (1)에서 ρ , R , V_w 는 제어 가능한 인자들이 아니므로 공기역학 출력 P_a 는 $C_p(\lambda, \beta)$ 의 조절을 통해서만 제어 할 수 있다.

토크-출력 간 관계($P_a = \omega_r T_a$)와 (2)를 이용하여 다 음과 같이 공기역학 회전 토크 T_a 를 구할 수 있다.

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

그림 2는 풍력 발전기를 회전 날개에서부터 발전 기까지의 구조로 도식화한 것이다. 저속 회전축 부분 을 운동 방정식으로 나타내면 다음과 같다.

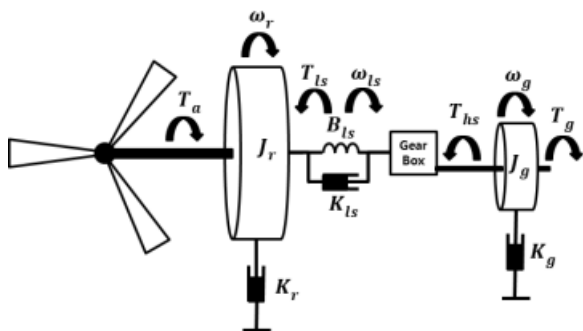


Fig. 2 Diagram of wind turbine

$$J_r \dot{\omega}_r = T_a - B_{ls}(\omega_r - \omega_{ls}) - K_{ls}(\omega_r - \omega_{ls}) - K_r \omega_r \quad (4)$$

여기서 J_r 는 회전 날개, 허브, 저속 회전축의 효과 를 모두 고려한 관성 모멘트를 나타낸다. B_{ls} 는 저속

회전축의 강성 계수, K_{ls} 는 저속 회전축의 댐핑 계수, K_r 는 회전 날개 외부 댐핑 계수이다. θ_r 은 회전 날개 의 회전 각도, θ_{ls} 는 저속 회전축의 회전 각도, ω_{ls} 는 저속 회전축의 각속도이다.

발전기 부분은 다음과 같은 운동 방정식으로 나타 낼 수 있다.

$$J_g \dot{\omega}_g = T_{hs} - K_g \omega_g - T_g \quad (5)$$

여기서 J_g 는 발전기의 관성 질량, T_{hs} 는 고속 회전 축 토크, K_g 는 고속 회전축의 외부 댐핑 계수, ω_g 는 발전기의 각속도, T_g 는 발전기 반력 토크이다. 기어 비 n_g 를 고려하면 다음과 같은 관계를 도출할 수 있 다.

$$n_g = \frac{\theta_g}{\theta_{ls}} = \frac{\omega_g}{\omega_{ls}} = \frac{T_{ls}}{T_{hs}} \quad (6)$$

저속 회전축이 완벽한 강성체라고 가정하면, (3)-(6)을 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$(J_r + n_g^2 J_g) \dot{\omega}_r = T_a - (K_r + n_g^2 K_g) \omega_r - n_g T_g \quad (7)$$

(7)을 다시 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\omega}_r = \bar{T}_a - \bar{K}_k \omega_r - \bar{T}_g \quad (8)$$

여기서

$$\bar{T}_a = \frac{T_a}{J_r + n_g^2 J_g},$$

$$\bar{K}_k = \frac{K_r + n_g^2 K_g}{J_r + n_g^2 J_g},$$

$$\bar{T}_g = \frac{n_g T_g}{J_r + n_g^2 J_g}$$

이다.

(8)은 풍력 발전기의 제어를 회전 날개의 각속도 제어 관점으로 바꾼 것이고, 피치 제어로 직접 영향 을 끼칠 수 있는 요소는 \bar{T}_a 뿐이다.

풍력 발전기의 날개는 불어오는 바람의 힘으로 회 전하고, 발전기를 회전시켜 출력을 얻게 되므로 발전 기의 출력 제어는 회전 날개의 각속도 제어 관점으 로도 볼 수 있다는 것과 일맥상통한다. 즉, 회전 날 개의 각속도를 정격 각속도로 제어하면 풍력 발전기 도 정격 전력을 생산하게 된다.

본 논문에서 제안한 피치 제어기는 풍력 발전기 관련 연구에서 참고 모델로 널리 사용되고 있는 NREL 5MW 풍력 발전기 모델에 적용하여 평가하였다.^{7,11,14} 해당 모델은 다물체 동역학 기반의 24 자유도를 갖는 비선형 모델¹¹로 (8) 도출 시 고려하지 못했던 여러 요소들을 포함하고 있어 피치 제어기 평가에 적합할 것으로 판단된다.

3. 피치 제어를 위한 이산 퍼지 PI 제어기

피치 제어기는 그림 3과 같이 회전 날개의 각속도를 정격 각속도로 회전하도록 회전 날개의 피치각을 제어하는 역할을 한다. 본 논문에서는 피치 구동기의 역학을 고려하지 않고, 피치 제어기의 명령에 따라 피치각이 제어된다고 가정한다.

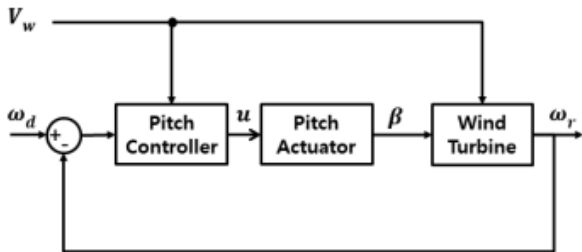


Fig. 3 Diagram of wind turbine for pitch control

3.1 이산 퍼지 PI 제어기를 이용한 피치 제어 시스템

이 절에서는 증분 형태의 이산 퍼지 PI 제어기에 대해 소개한다. 현실에서는 제어기를 주로 마이크로 프로세서나 컴퓨터와 같은 디지털 장치에 구현하기 때문에 이산 퍼지 제어기를 고려하였다. 또한, PI 제어기와 같이 오차와 오차의 변화율을 입력으로 갖는 이산 퍼지 제어기를 이산 퍼지 PI 제어기라고 한다. 여기서 T 는 제어 주기이며, 오차와 오차 변화율은 다음과 같이 정의된다.

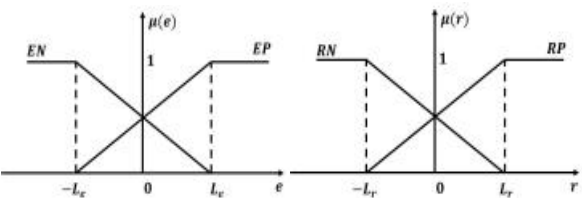


Fig. 4 Membership functions for input variables

$$e(k) = \omega_d - \omega_r(k), \quad (9)$$

$$r(k) = \frac{e(k) - e(k-1)}{T}. \quad (10)$$

본 논문에서는 선형식의 결론부를 갖는 이산 퍼지 PI 제어기를 제안하였다. 제어기의 복잡성을 최소화시키기 위해 각 입력에 대한 입력 퍼지 집합을 두 개로 한정하였다. 즉, $e(k)$ 에 대해 EN(Error Negative)과 EP(Error Positive), $r(k)$ 에 대해 RN(Rate Negative)과 RP(Rate Positive)를 할당하였다. 이 퍼지 집합들에 해당하는 소속 함수는 그림 4와 같이 배치하였고, 각 소속 함수는 수식적으로 다음과 같다.

$$\mu_{EN}(e(k)) = \frac{L_e - e(k)}{2L_e}, \quad (11)$$

$$\mu_{EP}(e(k)) = \frac{L_e + e(k)}{2L_e}, \quad (12)$$

$$\mu_{RN}(r(k)) = \frac{L_r - r(k)}{2L_r}, \quad (13)$$

$$\mu_{RP}(r(k)) = \frac{L_r + r(k)}{2L_r}. \quad (14)$$

사용한 퍼지 IF-THEN 규칙은 총 4개로 구성하였으며 다음과 같다.

R1: IF $e(k)$ is EN AND $r(k)$ is RN THEN $\Delta u(k)$ is $\alpha_1 e(k) + \beta_1 r(k)$

R2: IF $e(k)$ is EN AND $r(k)$ is RP THEN $\Delta u(k)$ is $\alpha_2 e(k) + \beta_2 r(k)$

R3: IF $e(k)$ is EP AND $r(k)$ is RN THEN $\Delta u(k)$ is $\alpha_3 e(k) + \beta_3 r(k)$

R4: IF $e(k)$ is EP AND $r(k)$ is RP THEN $\Delta u(k)$ is $\alpha_4 e(k) + \beta_4 r(k)$

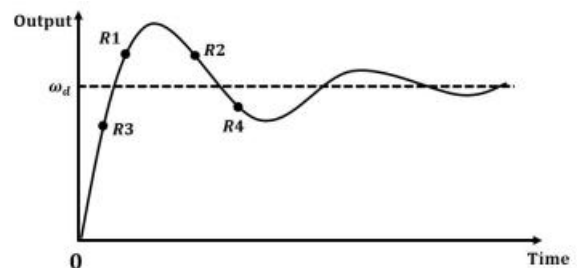


Fig. 5 Activation region for each IF-THEN rule of discrete fuzzy PI controller

퍼지 IF-THEN 규칙에서 보는 바와 같이 결론부에서 조정해야 할 파라미터의 수는 총 8개(=2×4)이며, 이것은 일반 PI 제어기보다 조정이 어렵다는 것을 의미한다. 각 규칙들이 주로 활성화되는 영역은 그림 5와 같다. 일반 PI 제어기와 달리 각 영역에서의 제어 결과에 따라 각 규칙에 해당하는 파라미터를 수정하면 된다. AND 연산으로는 (15)~(18)과 같이 최소 연산자를 사용하였다.

$$\mu_1 = \text{MIN}(\mu_{EN}, \mu_{RN}), \tag{15}$$

$$\mu_2 = \text{MIN}(\mu_{EN}, \mu_{RP}), \tag{16}$$

$$\mu_3 = \text{MIN}(\mu_{EP}, \mu_{RN}), \tag{17}$$

$$\mu_4 = \text{MIN}(\mu_{EP}, \mu_{RP}). \tag{18}$$

앞의 결과들을 중앙 평균 비퍼지화기를 이용하면 증분 형태의 이산 퍼지 PI 제어기의 출력을 계산할 수 있다.

$$\Delta u(k) = \frac{\sum_{i=1}^4 (\alpha_i e(k) + \beta_i r(k)) \mu_i}{\sum_{i=1}^4 \mu_i} \tag{19}$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^4 \alpha_i \mu_i}{\sum_{i=1}^4 \mu_i} \cdot e(k) + \frac{\sum_{i=1}^4 \beta_i \mu_i}{\sum_{i=1}^4 \mu_i} \cdot r(k)$$

(19)를 이용하면 이산 퍼지 PI 제어기의 최종 출력은

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \tag{20}$$

이 된다. 이산 퍼지 PI 제어기를 그림 3의 피치 제어 시스템에 적용하면 그림 6과 같은 구조가 된다.

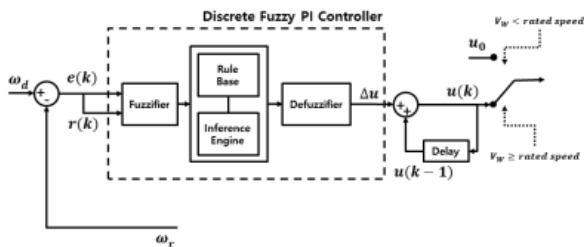


Fig. 6 Pitch control system for wind turbine using discrete fuzzy PI controller

3.2 이산 PI 제어기와 이산 퍼지 PI 제어기의 관계 이 절에서는 PI 제어기와 이산 퍼지 PI 제어기의 이득 간의 관계를 도출하고, 이 관계를 이산 퍼지 PI 제어기의 파라미터 조정에 이용한다.

이를 위해 먼저 증분 형태의 이산 PI 제어기를 유도한다. 일반적으로 연속시간 영역에서 PI 제어기(이하 연속 PI 제어기)는 다음과 같다.

$$u(t) = K \cdot \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_{\tau=0}^t e(\tau) d\tau \right) \tag{21}$$

$$= K e(t) + \frac{K}{T_I} \int_{\tau=0}^t e(\tau) d\tau$$

$$= K_{P,c} e(t) + K_{I,c} \int_{\tau=0}^t e(\tau) d\tau$$

여기서 $e(t)$ 는 (9)에 주어진 것과 같이 원하는 상태 값과 실제 상태 값의 차이이고, K 는 제어기 이득, T_I 는 적분 시간이다. 이를 정리하면, $K_{P,c}$ 와 $K_{I,c}$ 는 각각 연속 PI 제어기의 P 이득과 I 이득을 나타낸다. 연속 PI 제어기는 오일러 방법을 이용하여 다음과 같이 이산 PI 제어기로 변환할 수 있다.

$$u(k) = u(k-1) + K_{P,c}(e(k) - e(k-1)) + K_{I,c} T e(k) \tag{22}$$

(10)과 (22)로부터 증분 형태의 이산 PI 제어기는

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \tag{23}$$

$$= K_{P,c} T r(k) + K_{I,c} T e(k)$$

$$= K_{P,d} r(k) + K_{I,d} e(k)$$

이다. 여기서 $K_{P,d}$ 와 $K_{I,d}$ 는 각각 증분형 이산 PI 제어기의 P 이득과 I 이득이다. 여기서 주목할 점은 증분형 이산 PI 제어기의 경우, 연속 PI 제어기와 달리 P 이득이 오차의 변화율과 곱해지고, I 이득이 오차와 곱해진다는 것이다.^{15,16)}

이산 퍼지 PI 제어기 출력 (19)와 이산 PI 제어기 출력 (23)을 비교하면,

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha \text{ 과 } \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta \text{ 일 때,}$$

$$\alpha \cdot e(k) + \beta \cdot r(k) = K_{P,d} \cdot r(k) + K_{I,d} \cdot e(k) \text{ 이므로}$$

$$\alpha = K_{I,d} = K_{I,c} T, \tag{24}$$

$$\beta = K_{P,d} = K_{P,c} T \tag{25}$$

의 관계를 갖게 된다. 즉, 이산 퍼지 PI 제어기의 결론부를 구성하는 파라미터를 모든 규칙에 대해 동

일하게 설정하면 이산 PI 제어기와 같게 된다. 이것은 PI 제어기가 이산 퍼지 PI 제어기의 특수한 형태라는 것을 뜻한다. 또한, 이산 퍼지 PI 제어기가 PI 제어기보다 더욱 좋은 성능을 보여 줄 가능성이 있다는 것을 나타낸다. (19)에서 μ_i 가 $e(k)$ 와 $r(k)$ 에 따라 변하므로 이산 퍼지 PI 제어기는 가변 이득을 갖는 PI 제어기라고 할 수 있다.¹⁵⁾ 이러한 가변 이득의 유연성을 통하여 특정 동작점에 국한되어 설계된 PI 제어기에 비하여 이산 퍼지 PI 제어기는 동작점 뿐만 아니라 이를 벗어난 영역에서도 더 우수한 제어 성능을 발휘할 수 있다.

본 논문에서 도출된 관계식 (24), (25)는 쉽고 체계적인 퍼지 PI 제어기 설계에 이용될 수 있다. 일반적으로 n 개의 입력 변수를 갖고, 각 입력 변수에 대해 m 개의 퍼지 집합을 사용하고, 각 IF-THEN 규칙에 대해 p 개의 결론부 파라미터를 갖는 퍼지 제어기는 총 $p \times m^n$ 개의 결론부 파라미터를 조정해야 한다. 일반적으로 퍼지 제어기를 구성할 때는 보통 2개 이상의 입력 변수와 각 입력 변수에 대해 5개 이상의 퍼지 집합을 사용한다.^{6,17)} 즉, 최소 25개의 파라미터를 조정해야 한다. 그러나 본 논문에서 제안한 제어기의 경우, 8개의 결론부 파라미터만을 가지고 있고, 이 파라미터들의 초기값은 기존 PI 제어기로부터 얻을 수 있기 때문에 퍼지 PI 제어기 설계가 쉽고 체계적이다. 쉬운 설계를 위해 퍼지 IF-THEN 규칙은 최소한으로 사용하여 4개만 사용하였으며, 퍼지 파라미터는 관계식 (24), (25)를 통하여 얻는다. 그리고 특정한 퍼지 규칙에 대해 결론부 파라미터를 조절하여 비선형 제어 표면을 추가적으로 조정하여 제어성능을 향상한다. 다음 장에서 제안하는 방법의 적용 예를 시뮬레이션을 통하여 보인다.

4. 시뮬레이션

이 장에서는 시뮬레이션을 통하여 제안한 제어기의 파라미터를 선정하고 제어성능을 고찰한다. 이를 위해 NREL에서 제공하는 5MW 풍력 발전기 모델을 제어 대상으로 고려하였고, 이는 다물체 동역학 기반의 24 자유도를 갖는 비선형 모델이다. 해당 모델의 주요 파라미터는 표 1과 같다.

퍼지 제어는 정격 풍속 이상의 바람이 부는 상황에서 동작하므로, 풍력 발전기가 받는 풍속은 주로 정격 풍속(11.4m/s) 이상이라고 가정하였다. 본 논문에서는 두 가지의 풍속 프로파일에 대해 제어기를

평가하였는데, 가혹한 상황을 가정하기 위해 그림 7과 같이 갑작스럽게 풍속이 변하는 경우와 실제 상황을 반영하기 위해 무작위로 풍속이 변하는 그림 8과 같은 경우를 가정하였다. 제어기의 성능은 풍속이 변하는 상황에서 정격 각속도(12.1rpm)를 회전 날개의 각속도가 얼마나 잘 추종하는지를 가지고 판단하였다.

Table 1 Parameters of NREL 5MW wind turbine model

항목	내용
정격 출력	5MW
허브 높이	90m
허브 직경	3m
회전 날개의 회전 직경	126m
기동, 정격, 차단 풍속	3, 11.4, 25m/s
정격 회전 날개 각속도	12.1rpm
기어비	97:1
나셀 질량	240,000kg
타워 질량	347,460kg

4.1 이산 PI 제어기 설계

관계식 (24)와 (25)를 이용하기 위해, 먼저 이산 PI 제어기를 설계한다. 이를 위해 우선 연속 PI 제어기를 설계하고, 이를 (22)를 이용하여 이산 PI 제어기로 변환한다.

연속 PI 제어기의 이득 선정에는 여러 방법들이 있지만, 본 논문에서는 J. Jonkman이 제안한 방법과 같이 모델 선형화 기법을 이용하였다.¹¹⁾

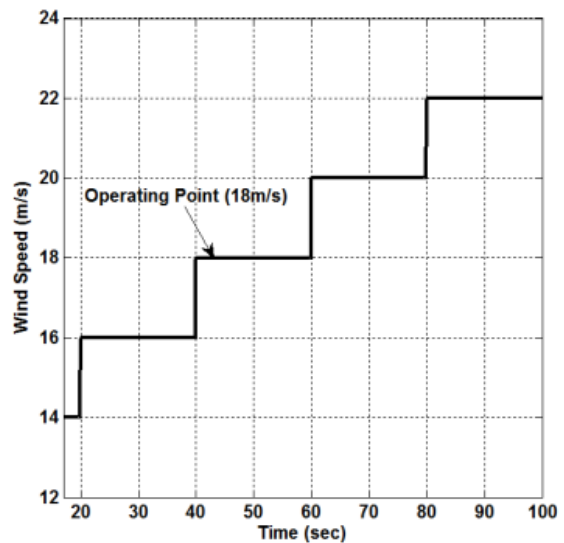


Fig. 7 The first wind speed profile for simulation

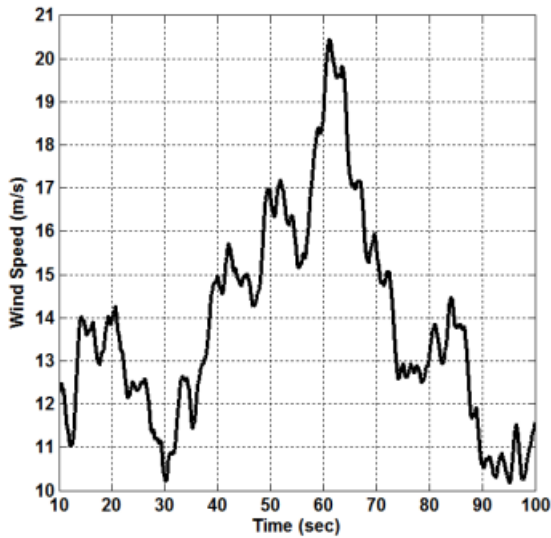


Fig. 8 The second wind speed profile for simulation

먼저 모델 선형화를 위해 풍속, 회전 날개의 각속도, 피치각으로 이루어진 동작점을 선정한다. 선정된 동작점은 $(V_{W0}, \omega_r, \beta_0) = (18\text{m/s}, 12.1\text{rpm}, 15^\circ)$ 이고, 해당 동작점에서 선형화된 모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\omega}_r = A\omega_r + Bu + B_d V_W \quad (26)$$

여기서 A 는 시스템 행렬, B 는 제어 입력 벡터, B_d 는 외란 입력 벡터이다. 연속 PI 제어기를 라플라스 영역에서 나타내면 다음과 같다.

$$U(s) = K_{P,c}\omega_r(s) + K_{I,c}\frac{1}{s}\omega_r(s) \quad (27)$$

$U(s)$ 는 제어 입력 u 의 라플라스 변환 결과이다. (27)을 (26)의 라플라스 변환 결과에 대입하면 다음과 같은 전달함수를 구할 수 있다.

$$\frac{\omega_r(s)}{V_W(s)} = \frac{B_d}{s^2 + (-A - BK_{P,c})s + (-BK_{I,c})} \quad (28)$$

(28)의 분모 부분을 다음의 잘 알려진 이차 전달함수의 특성 방정식과 비교하였다.

$$s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (29)$$

여기서 ξ 는 댐핑 계수이고, ω_n 는 고유 진동수이다.

이로부터 연속 PI 제어기의 이득은 다음과 같이 표현된다.

$$K_{P,c} = -\frac{A}{B} - \frac{2\xi\omega_n}{B}, K_{I,c} = -\frac{\omega_n^2}{B} \quad (30)$$

동작점에서의 선형화 결과인 A 와 B , 설계 인자인 ξ 와 ω_n 를 정하면 연속 PI 제어기의 이득을 결정할 수 있게 된다.

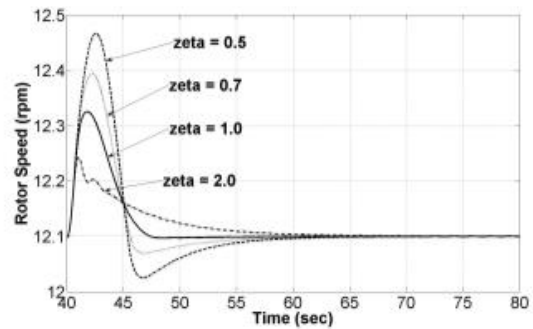


Fig. 9 Step responses of PI controlled pitch system for various (zeta) when the wind speed changes from 17m/s to 18m/s.

FAST에서 제공하는 기능을 이용하여 선정된 동작점에서의 선형화 모델을 도출하면 $A = -0.55366$, $B = -1.1878$ 이고, $B_d = 0.027752$ 이다. ω_n 은 0.6rad/sec로 선정하였다.^{12,13)} ξ 에 대해서는 그림 9와 같이 여러 후보 군을 가지고 스텝 응답을 살펴보고, 그 결과 1.0으로 선정하였다. 해당 파라미터들을 (30)에 대입하면 연속 PI 제어기의 이득은 각각 $K_{P,c} = 0.544$ 과 $K_{I,c} = 0.303$ 이 된다.

제어 주기를 $T = 0.01\text{sec}$ 로 선정하고, (24)와 (25)를 이용하면 $K_{P,d}$ 와 $K_{I,d}$ 는 각각 0.00544과 0.00303이 된다. 즉, (23)에 의해 이산 PI 제어기의 출력은 다음과 같게 된다.

$$u(k) = u(k-1) + 0.00544 \cdot r(k) + 0.00303 \cdot e(k) \quad (31)$$

4.2 이산 퍼지 PI 제어기 설계

두 이산 제어기의 관계인 (24)와 (25)를 이용하여 이산 퍼지 PI 제어기의 초기 파라미터를 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 0.00303$, $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 0.00544$ 로 선정하였다. 입력 소속 함수의 파라미터인 L_e 와 L_r 은 입력 $e(k)$ 와 $r(k)$ 의 범위를 충분히 포함할 수 있도록 100으로 선정하였다.

Table 2 Consequent part parameters of discrete fuzzy PI controller

IF-THEN 규칙	α_i	β_i
R1	0.00303	0.00544
R2	0.00909	0.01632
R3	0.00909	0.01632
R4	0.00303	0.00544

모든 퍼지 IF-THEN 규칙 R1, R2, R3, R4의 결론부 파라미터에 대해 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha$ 과 $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta$ 라고 가정하면, 초기의 이산 퍼지 PI 제어기는 이산 PI 제어기와 수학적으로 동등하다. 따라서 이산 PI 제어기는 이산 퍼지 PI 제어기의 특수한 형태이다. 이는 이산 퍼지 PI 제어기가 최소한 이산 PI 제어기의 성능은 보일 수 있다는 것을 의미하고, 퍼지 IF-THEN 규칙에 적용되는 파라미터를 조정함으로써 더욱 개선된 성능을 얻을 수 있다.

이산 퍼지 PI 제어기의 성능 개선은 이산 PI 제어기로부터 얻은 초기 파라미터로부터 시작한다. 규칙 R2와 R3가 담당하는 영역(그림 5)에서 더욱 빠른 과도 응답을 얻기 위해 해당 규칙의 결론부 파라미터를 초기값보다 크게 조정하였다. 여러 풍속 조건 하에서 좋은 성능을 확보하기 위해, 이산 퍼지 PI 제어기의 파라미터는 그림 7의 풍속 프로파일1에서 시뮬레이션을 수행하여 조정하였다.

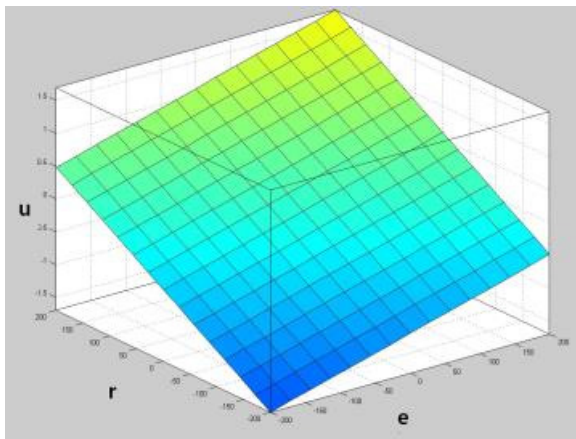


Fig. 10 Control surface of initial discrete fuzzy PI controller

최종적으로 조정된 이산 퍼지 PI 제어기의 결론부 파라미터는 표 2와 같다. 퍼지 제어기는 모든 규칙의 가중치를 고려하여 출력이 결정되기 때문에 규칙 R2와 R3의 파라미터 변화는 그림 5의 규칙 R1과 R4가 담당하고 있는 영역에도 영향을 미치게 된다.

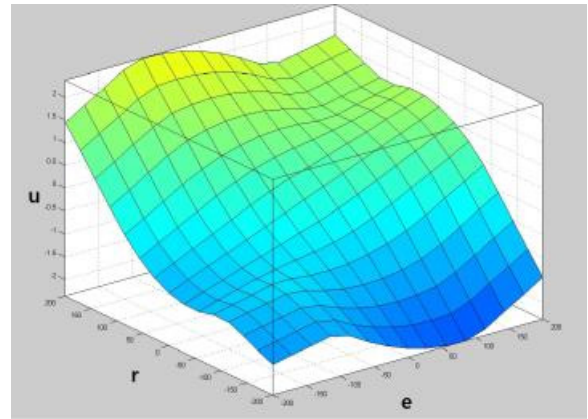


Fig. 11 Control surface of tuned discrete fuzzy PI controller

초기의 이산 퍼지 PI 제어기와 조정된 이산 퍼지 PI 제어기의 출력은 각각 그림 10와 그림 11과 같다. 결론부를 모두 같게 설정한 초기의 이산 퍼지 PI 제어기가 선형의 출력을 보이는 것과 달리 조정된 이산 퍼지 PI 제어기는 비선형의 출력을 보이는 것을 알 수 있다. 또한 그림 13에서 알 수 있듯이 오차의 절대값이 커질수록, 오차 변화율의 절대값이 커질수록 더욱 큰 제어 출력을 내는 경향성을 보인다. 이러한 특성은 정성적으로 제어 시스템의 빠른 과도 응답을 이끌어 낼 수 있을 것으로 예상할 수 있다.

4.3 풍력 발전기용 피치 제어기의 비교

4.1절의 두 풍속 프로파일에 대해 표 2의 파라미터를 갖는 이산 퍼지 PI 제어기가 이산 PI 제어기보다 목표 각속도(12.1rpm)를 더 잘 추종한다. 그림 12는 풍속 프로파일 1에 대한 제어 결과이다. 프로파일 1의 20, 40, 60, 80초 지점에서 풍속은 급변하게 되고, 해당 풍속 변화에 따라 각속도도 크게 변하게 된다. 피치 제어기는 각속도의 변화를 감지하여 각속도를 정격 각속도로 제어하는 역할을 한다. 해당 프로파일에서 이산 퍼지 PI 제어기가 이산 PI 제어기보다 더욱 작은 오버슈트를 보이고 더욱 빨리 정격 각속도로 수렴하는 것을 알 수 있다. 그림 13은 풍속 프로파일 2에 대한 제어 결과이다. 무작위의 풍속 프로파일에 대해서도 이산 퍼지 PI 제어기가 이산 PI 제어기보다 회전 날개의 각속도를 정격 각속도에 더 잘 추종하도록 제어하는 것을 알 수 있다. 또한, 그림 14와 그림 15로부터 이산 퍼지 PI 제어기가 이산 PI 제어기보다 풍속에 따라 피치 각도 조절에 대해 더욱 빠른 응답을 보이는 것을 알 수 있다. 제어 결과를 평균 제곱근 편차로 나타내면 표 3과 같고, 약

20~30%의 성능 개선이 있었다. 이 결과는 최종적으로 조정된 이산 퍼지 PI 제어기가 비선형의 출력을 보이면서 오차와 오차의 변화율에 대응하여 이득 값이 변하는 이산 PI 제어기처럼 동작하기 때문인 것으로 판단된다.

Table 3 Root Mean Square Error of Controllers in two wind profiles

Wind Condition	이산 PI 제어기	최종 이산 퍼지 PI 제어기
Profile 1	0.0026	0.0020
Profile 2	0.0045	0.0031

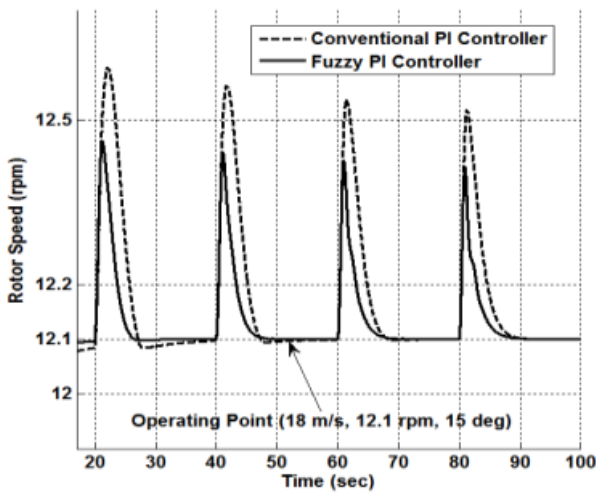


Fig. 12 Regulation result for the first wind speed profile

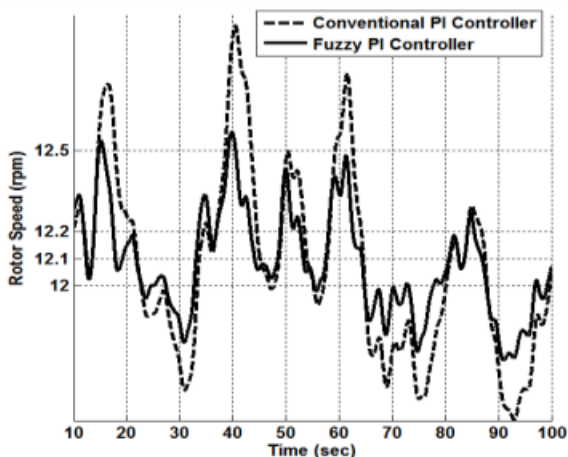


Fig. 13 Regulation result for the second wind speed profile

종합하면 이산 PI 제어기보다 제안하는 이산 퍼지 PI 제어기가 우수한 추종 성능을 보인다. 그림 12의

결과에서 볼 수 있듯이 선형화를 위해 선정된 동작점(그림 12의 40~60초 사이)에서 이산 퍼지 PI 제어기가 이산 PI 제어기보다 과도상태 및 정상상태 모두에서 우수한 성능을 보일 뿐만 아니라, 동작점을 벗어난 영역(그림 12의 40~60초 외의 영역과 그림 15와 같은 무작위 풍속 조건)에서도 이산 퍼지 PI 제어기가 동작점 기반으로 설계된 이산 PI 제어기와 비교하여 더 우수한 성능을 보인다.

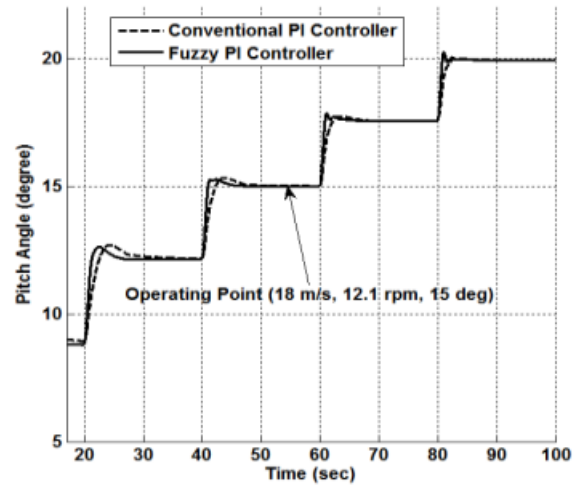


Fig. 14 Pitch angle result for the first wind speed profile

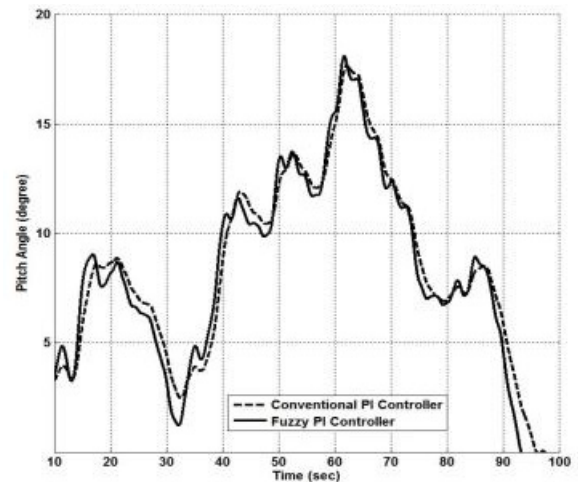


Fig. 15 Pitch angle result for the second wind speed profile

6. 결 론

본 논문에서는 풍력 발전기 피치 제어를 위한 퍼지 PI 제어기를 제안하고, 제안한 제어기를 위한 쉽고 체계적인 퍼지 파라미터 조정 방법을 제안하였다. 제안한 이산 퍼지 PI 제어기는 최소 연산자를 AND

연산자로 사용하고, 중앙 평균 비퍼지화기를 사용하였다. 제안한 이산 퍼지 PI 제어기는 입력에 따라 제어 이득 값이 변하는 가변 이득 PI 제어기의 특성을 보인다. 이산 PI 제어기가 수학적으로 이산 퍼지 PI 제어기의 특수한 경우인 것을 보이고, 이산 PI 제어기 이득을 이용하여 이산 퍼지 PI 제어기의 파라미터를 조정하는 방법을 제안하였다. 제안한 이산 퍼지 PI 제어기를 NREL에서 제공하는 5MW 풍력 발전기 모델에 적용한 시뮬레이션을 통하여 이산 PI 제어기보다 더 좋은 제어 성능을 보임을 검증하였다.

후 기

이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 국가과학기술연구회의 지원을 받아 수행된 한국전기연구원 주요사업으로 수행된 연구임 (No. 17-12-N0101-22).

References

- 1) T. Senjyu, R. Sakamoto, N. Urasaki, T. Funabashi, H. Fujita, and H. Sekine, "Output Power Leveling of Wind Turbine Generator for All Operating Regions by Pitch Angle Control," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 21, no. 2, pp. 467-475, June 2006.
- 2) S. Y. Kim, and S. H. Kim, "A Design for a Fuzzy Logic based Frequency Controller for Efficient wind Farm Operation," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 186-192, February 2014.
- 3) D. Lee, H. C. Sung, and Y. H. Joo, "Fuzzy Modeling and Robust Stability Analysis of Wind Farm based on Prediction Model for Wind Speed," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 20, no. 1, pp. 22-28, January 2014.
- 4) H. C. Sung, M. H. Tka, and Y. H. Joo, "Robust Fuzzy Controller for Mitigating the Fluctuation of Wind Power Generator in Wind Farm," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 19, no. 1, pp. 34-39, January 2013.
- 5) 남윤수, 윤태준, 박종식, "풍력 터빈의 피치 제어," 2008년 제어자동화시스템 심포지엄, pp. 41-44, 2008년 10월.
- 6) 김병문, 육의수, 김성호, 풍력발전 시스템을 위한 퍼지로지 기반의 피치제어기 설계, 2011년도 제어

로봇 시스템학회 전북제주지부 학술대회 논문집, pp. 90-94, 2011년7월.

- 7) J. Cheon and S. Kwon and Y. Choi, "Design of a pitch controller using disturbance accommodating control for wind turbines under stochastic environments," 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics, pp. 2572-2577, June 2014.
- 8) B. Boukhezzar, L. Lupu, H. Siguerdidjane, and M. Hand, "Multivariable control strategy for variable speed, variable pitch wind turbines," *Renewable Energy*, vol. 32, no. 8, pp. 1273-1287, July 2007.
- 9) F.D. Bianchi, H.D. Battista and R.J. Mantz, *Wind Turbine Control Systems, Principles, Modeling and Gain Scheduling Design*, Springer-Verlag London Limited, 2007.
- 10) K. Selvan, *Individual Pitch Control for Large Scale Wind Turbines, Multivariable control approach*, ECN-E07-053, 2007.
- 11) J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial and G. Scott, *Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development*, NREL/TP-500-38060, 2009.
- 12) M.H. Hansen, A. Hansen, T.J. Larsen, S. Oye, P. Sorensen, P. Fuglsang, *Control Design for a Pitch-regulated Variable-speed Wind Turbine*, Report Riso-R-1500(EN) Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark, 2005.
- 13) A. D. Wright and L. J. Fingersh, *Advanced Control Design for Wind Turbines Part I: Control Design, Implementation, and Initial Tests*, NREL Report No. TP-500-42437, National Renewable Energy, 2008.
- 14) J. Kim, J. Cheon, J. Lee, and M. Jin, "Design of pitch controller for wind turbines using time-delay estimation," 2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, pp. 113-1136, August 2015.
- 15) H. Ying, *Fuzzy Control and Modeling: Analytical Foundations and Applications*, IEEE Press, New York, 2000.
- 16) O.K. Choi, J. Kim, J. Kim and J. Lee, "BIBO stability analysis of TSK fuzzy PI/PD control systems," *Intelligent Automation and Soft Computing*, vol. 21, no. 4, pp. 645-658, Feb 2015.
- 17) K.M. Passino, and S. Yurkovich, *Fuzzy Control*, Addison-Wesley, 1998.