Journal of Korean Institute of Intelligent Systems, Vol. 23, No. 1, February 2013, pp. 1-6
http://dx.doi.org/10.5391/JKIIS.2013.23.1.1

가변적인 PID 이득에 기초한 풍력발전 시스템의 피치제어

Pitch Angle Control of Wind Turbine based on Variable PID Gains

고정민* · 양수형** · 부창진** · 김호찬** · 허종철*** · 이정훈**** · 강민제*†
Jung-Min Ko,* Soo-Youg Yang,** Chang-Jin Boo,** Ho-Chan Kim,**
Jong-Chul Huh,*** Junghoon Lee**** and Min-Jae Kang*†

*제주대학교 전자공학과, **제주대학교 전기공학과, ***제주대학교 기계시스템공학부,
****제주대학교 전산통계학과
† Department of Electronic Eng., Department of Electrical Eng., Faculty of Mechanical System Eng., Department of Computer Science and Statistics, Jeju National University

요 약

정격풍속이상에서 발전기의 출력을 일정하게 유지하기 위하여 PID에 기초한 다양한 종류의 방법들이 발표되었다. 그러나 고정된 PID 이득을 이용한 이러한 방법에서는 전 영역에서 동작하리라는 보장이 없다. 이 논문에서는 전 영역에서 동작하는 시스템을 설계하기 위하여 풍속의 강도에 따라 PID 이득이 변하는 방법을 제안하였다. 풍속의 강도에 따라 피치각에 따른 전력의 민감도는 계속 변하는데, PID 이득을 민감도의 함수로 유도하였다.

키워드 : 변속풍력발전시스템, 블레이드 피치제어, PID 이득, 민감도

Abstract

For regulating generator speed above the rated wind, versatile methods have been published based on PID. However, these methods with the fixed PID gains could not guarantee that the controller works well in the whole area. In this paper, variable PID gain method has been suggested to overcome this problem. The sensitivity of power to blade pitch angle changes according to wind speed. The variable PID gain function has been derived from this sensitivity.

Key Words : A variable-speed wind turbine, Blade-pitch controller, PID gain, Sensitivity

1. 서 론

풍력 터빈(wind turbine)의 동작상태는 풍속에 따라 변하게 된다. 정격 풍속 이전의 영역에서는 보다 많은 바람 에너지를 회수하도록 하고, 정격풍속 이후의 영역에서는 풍력 터빈(wind turbine)의 출력이 일정하도록 동작되어야 한다. 따라서 제어시스템은 크게 두 부분, 즉 정격풍속 이전과 이후의 제어로 나눌 수 있다. 정격풍속 이전에서는 바람 에너지 회수율을 최대로 하는 제어전략이며, 정격풍속 이후에서는 터빈의 출력을 일정하게 제어하는 전략이다[1].

정격풍속 이상에서 출력을 일정하게 하는 방법에 관한 다양한 PID제어 방법들이 발표되었다. 대부분의 방법들은 특정 동작점에서 터빈의 특성을 선형화하여 제안된 것들이다[2]. 그러나 이런 방법들은 터빈의 동작점이 원래 점에서 벗어나게 되면 만족할 수 없는 결과를 낳기도 한다. 그래서 이러한 문제점들을 개선하기 위하여 터빈의 비선형 모델에 근거한 방법들도 발표되었다. 비선형 터빈의 특성을 모델화하기 위하여 Sakamoto는 고차다항식을 이용하였으며 Slootweg는 초월함수를 채택하였다[3,4]. 이렇게 설계된 방법들은 특정 터빈에 양호한 결과를 보였다. 그러나 터빈의 역학특성은 터빈의 종류에 따라 다양하여 유일한 수학 다항식으로 표현이 어렵다. 그래서 이런 방법들은 모든 터빈에 적용할 수 있는 일반적인 방법이라 할 수 없다. Hand와

접수일자: 2012년 6월 13일
심사(수정)일자: 2012년 12월 11일
게재확정일자 : 2012년 12월 13일
† Corresponding author
이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(2010-0025438)과 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP) 풍력특성화대학원 인력양성사업(NO.200940 20200020)의 지원을 받아 수행된 것입니다.
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.

Balas는 실험적인 방법에 근거하여 PID제어기를 설계하는 방법을 제안하였다[2]. 그러나 이 방법에서는 PID 이득율을 구하기가 쉽지 않다. 그리고 고정된 이득율을 이용하기 때문에 전 영역에서 작동하리라는 보장이 없다.

본 논문에서는 전 영역에서 작동하는 제어기를 설계하기 위하여 동작점에 따라 PID 이들율을 조절할 수 있는 방법이 제안되었다. 정격풍속 이후의 영역에서 풍력터빈의 출력을 일정하게 유지시키기 위하여 블레이드의 피치각을 조절한다. 풍속의 강도에 따라 블레이드 피치각이 계속 변하게 되는데, 이 피치각에 기인하여 PID 이득율도 계속 변하게 설계되었다.

2. Wind turbine model

2.1 모델

가변속 풍력터빈시스템의 전체적인 구성을 블록다이어그램으로 나타내면 그림 1과 같다. 바람이 불어 들어오면 Rotor Aerodynamics에서 공기 역학적 토크 T_r을 만들어 내고 Drive-Train을 통해서 발전기 토크 T_g로 변환된다. 여기서 T_r은 공기 역학적 토크, T_g는 발전기 토크, Ω_r은 로터의 회전 속도, Ω_g는 발전기 회전 속도이며, P_g는 발전기 출력을 나타낸다. 입력은 풍속 $v[m/s]$이고 최종 출력은 발전기 출력 $P_g[W]$이다[3].

본 논문에서 확인하고자 하는 것은 풍속에 따라 가변적인 PID 이득 제어기를 사용하였을 때 로터의 회전속도, 피치각, 발전기 토크, 공기 역학적 토크와 발전기 출력이 어떻게 변하고 달라지는 지를 확인하고자 한다.

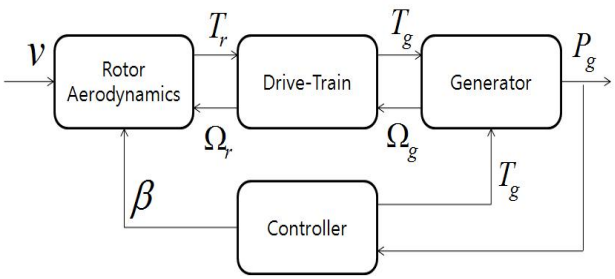

그림 1. 풍력발전시스템의 블럭도
Fig. 1. Block Diagram of Wind Turbine System

2.2 Turbine aerodynamics

앞의 서론에서 언급하였듯이 풍력 터빈시스템은 운동 에너지를 전기 에너지로 변환시키는 장치이다. 여기서 풍력터빈의 에너지원은 바람의 흐름으로 바람의 시간당 운동 에너지는 다음과 같다[4].

$$P_t = \frac{1}{2}mv^2\frac{1}{t} = \frac{1}{2}(\rho Al)v^2\frac{1}{t} = \frac{1}{2}\rho Av^3[W] \quad (1)$$

여기서 m은 질량$[kg]$, ρ는 공기밀도$[kg/m^3]$, A는 블레이드의 단면적$[m^2]$, l은 이동거리$[m]$, v는 풍속$[m/s]$이다. 본 논문에서는 사용된 공기 밀도 는 $1.2231[kg/m^3]$를 사용하였다. 바람이 풍력 터빈을 지나면서 발생하는 터빈의 기계적 에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_r = \frac{1}{2}\rho Av^3C_p(\lambda,\beta)[W] \quad (2)$$

여기서 λ는 주속비(TSR : Tip Speed Ratio)이고, β는 피치각(pitch angle)이다. 주속비(TSR : Tip Speed Ratio)는 풍속(wind speed)에 대한 블레이드(blade)의 끝단 속도의 비라고 할 수 있다. 이를 식으로 표현하면,

$$\lambda = \frac{\Omega_r R}{v} \quad (3)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서 Ω_r은 앞에서 설명한 로터(rotor)의 각속도$[rad/s]$이고, R은 로터의 반경$[m]$을 의미한다. 여기서 공기 역학적 출력 $P_r[W]$을 로터의 각속도로 나누면 공기 역학적 토크 $T_r[Nm]$인 다음과 같은 식을 만들 수 있다.

$$T_r = \frac{1}{2\Omega_r}\rho Av^3c_p(\lambda,\beta) \quad (4)$$

식 (2)에 의하면 C_p값이 일정하다면 풍속이 증가함에 따라 풍력 터빈 시스템의 출력 $P_r[W]$는 풍속의 3승에 비례하여 증가할 것이다. 그리고 풍속이 일정하다면 풍력 터빈 시스템의 출력 $P_r[W]$는 C_p에 따라 출력 값이 결정된다.

2.3 동력전달장치 모델

본 논문에서 사용된 풍력 터빈 시스템의 동력 전달 장치 모델은 그림 2와 같다. 그림 2와 같이 나타나는 동력 전달 장치는 회전자로부터의 에너지를 발전기로 전달해주며, 발전기가 필요로 하는 회전속도로 증속하기 위해 기어로 구성되어 있다.

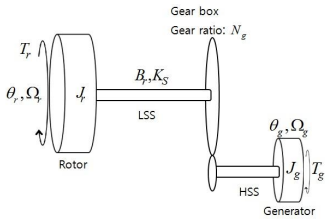

그림 2. 동력전달장치 모델
Fig. 2. Drive Train Model

그림 2에서 J_r은 3개의 블레이드, 허브 그리고 저속 회전축(low speed shaft, LSS)의 효과를 모두 고려한 관성질량(moment of inertia)이고, J_g는 발전기 회전축의 관성질량을 의미한다. 3개의 블레이드의 운동으로 인해 공기역학적 토크가 발생하게 된다. 이는 식 (4)와 같다. 식 (4)와 그림 2를 관성질량에 대하여, Newton의 운동 방정식을 적용하면 다음과 같은 식을 유도할 수 있다[4].

$$J_r\frac{d\Omega_r}{dt} = T_r - K_s(\theta_r - \frac{1}{N_g}\theta_g) - B_r(\Omega_r - \frac{1}{N_g}\Omega_g) \quad (5)$$

$$J_g\frac{d\Omega_g}{dt} = \frac{K_s}{N_g}(\theta_r - \frac{1}{N_g}\theta_g) + \frac{B_r}{N_g}(\Omega_r - \frac{1}{N_g}\Omega_g) - T_g \quad (6)$$

여기서 K_s는 동력 전달축의 비틀림 상수이고, B_r은 동력 전달축의 비틀림 댐핑 상수이다. 그리고 N_g는 기어박스의 기어비이고, θ_r, θ_g는 각각 저속 회전축(LSS)와 발전기측의 고속 회전축(HSS)의 각도를 의미한다. 또한 Ω_r, Ω_g는 저속 회전축과 고속 회전축의 각속도를 의미한다.

2.4 풍력 터빈 시스템의 발전기 모델

풍력 터빈 시스템에서 가장 흔히 쓰이는 발전기는 이중여자 형유도발전기(DFIG)이다. 그림 1에서 보는바와 같이 풍속모델에서 계산된 바람은 발전기에 바람에너지를 입력한다. 터빈모델은 바람에너지를 기계적인 에너지로 변환하는 역할을 하고 터빈과 증속기어를 통해 맞물려있는 회전자를 돌려 전기를 발생시킨다. 발생된 전기는 고정자를 통해 계통에 공급되고 또한 컨버터를 통하여 운전상태에 따라 발전기의 일부 출력이 제어되어 계통으로 전력을 공급하게 된다.

그런데 풍력발전의 피치 제어 시스템이 제대로 작동하는가를 테스트하는 실험에서 일반적으로 DFIG발전기는 제대로 작동한다고 가정하여 실시한다. DFIG발전기는 통계적으로 기계에너지의 95%를 전기에너지로 변환시킨다. 그래서 여기에서도 그림 1의 발전기 모델은 입력되는 기계에너지에 간단하게 효율을 곱하는 모델을 사용하였다. 여기서 사용된 발전기 효율 값도 0.95로 하였다.

2.5 풍력 터빈 시스템의 제어기

그림 3은 이상적인 출력 곡선을 나타낸다. 이 그래프의 목적은 시동 풍속 $V_{\min}$과 종단 풍속 V_{out}에 의해 운전 풍속의 범위를 정하는데 있다. 풍속이 범위 밖에 있게 되면 풍력 터빈은 정지해 있게 된다. 시동 풍속 $V_{\min}$이하에서는 운전 비용과 손실을 보상에 대한 이용 가능한 에너지가 너무 적다. 그리고 종단 풍속 V_{out}이상에서는 풍력 터빈 시스템의 구조적인 과부하로부터 보호하기위해 정지한다.

그림 3. 풍력발전의 이상적인 출력곡선

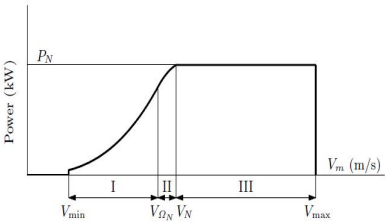

Fig. 3. Ideal Power Curve of Wind Turbine systems

영역-I의 목적은 로터 블레이드로 불어 들어오는 바람 에너지의 회수 효율이 최대가 되도록 풍력 터빈을 제어하는데 있다. 즉, C_p값이 최대 값을 유지할 수 있도록 제어가 이루어져야 한다. 영역-III에서는 풍력 터빈의 출력을 정격출력으로 일정하게 유지되어야 한다. 이 영역에서는 풍속이 정격풍속이상이므로 제어기가 없으면 터빈의 출력은 정격출력을 넘게 된다. 이 때 일반적으로 사용되는 제어기는 블레이드의 피치각을 제어하여 바람 에너지 회수 효율을 낮추는 방식이다. 그리고 영역-II은 영역-I과 영역-III사이에서 자연스런 전환이 이루어지도록 제어가 수행되는 영역이다[5].

3. 피치제어를 위한 가변 이득 PID 제어기 설계

3.1 풍력터빈 피치제어 모델

본 논문에서는 단일자유도(single-degree-of-freedom)를 이용하여 피치제어 시스템을 설계하였다. 왜냐하면 피치제어기의 목적은 발전기의 회전속도를 제어하는 데 있기 때문이다. 식 (5)와(6)으로부터 다음과 같은 단일자유도 방정식을 유도할 수 있다[5].

$$T_r - N_g T_g = (J_r + N_g^2 J_g)\frac{d}{dt}(\Omega_o + \Delta\Omega) = J_d \Delta\Omega' \qquad (7)$$

여기서 J_r은 로터의 관성 질량이고 J_g는 고속 축에 걸리는 발전기 관성 질량을 나타낸다. 그리고 J_d는 J_r과 J_g를 합성한 것으로 동력 전달 축의 관성 질량을 의미한다. Ω_o는 저속 축의 정격 회전 속도이고, $\Delta\Omega$는 저속 축의 회전 속도 변화율, 그리고 $\Delta\Omega'$는 저속 축의 회전 가속도를 나타낸다.

피치제어가 이루어지는 영역에서는 발전기 토크는 일정한 발전기 출력을 유지하기위해 제어가 이루어지기 때문에 발전기 토크는 발전기 회전 속도에 반비례적이다. 이에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$T_g = \frac{P_{rated}}{N_g \Omega_r} \qquad (8)$$

여기서 P_{rated}는 발전기 정격 출력이고 N_g는 기어비이다. 그리고 Ω_r은 저속 축의 회전 속도이다.

피치 제어가 이루어지는 영역에서는 로터 회전 속도의 변화가 거의 없기 때문에 이에 대한 공기 역학적 토크의 변화를 무시할 수 있다고 가정을 하면, 즉 정격 회전 속도에 있다고 하면, 공기 역학적 토크는 다시 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_r(\theta) = \frac{P(\beta, \Omega_{rated})}{\Omega_{rated}} \qquad (9)$$

즉, 저속 축의 회전 속도는 정격에 도달하여 변화가 없으므로 출력과 토크는 피치각(pitch angle)에 의해서만 결정된다고 할 수 있다. 여기서 β는 피치각을 의미하고 P는 발전기 출력이다.

위의 식(8)과 식(9)를 1차 Taylor Series를 이용하여 선형화를 하면 다음과 같다.

$$T_g \approx \frac{P_{rated}}{N_g \Omega_{rated}} - \frac{P_{rated}}{N_g \Omega_{rated}^2}\Delta\Omega \qquad (10)$$

$$T_r \approx \frac{P_{rated}}{\Omega_{rated}} + \frac{1}{\Omega_{rated}}\left(\frac{\partial P}{\partial \beta}\right)\Delta\beta \qquad (11)$$

3.2 가변 이득 PID 제어기 설계

본 논문에서는 가변 이득 PID 제어기를 설계하였다. PID 제어기를 설계하기 위하여 먼저 PI제어기를 설계하여 최적화된 PI이득 값을 찾고, 그 값을 바탕으로 해서 적절한 D이득 값을 찾는 방법을 선택하였다.

3.2.1 PI 제어기 설계

식(10)은 식(8)을 저속 축의 회전 속도인 Ω에 대해서 미분한 결과이고, 식(11)은 식(9)를 피치각인 θ에 대해서 미분한 결과이다. $\Delta\beta$는 각각의 작동점에 대해서 피치각의 작은 변화를 의미한다. 이를 PI 제어기를 사용하여 나타내면 다음과 같다[6].

$$\Delta\beta = K_p N_g \Delta\Omega + K_i \int_0^t N_g \Delta\Omega dt \qquad (12)$$

K_p, K_i는 피치 제어기의 비례 이득과 적분 이득이다. 여기서 $\Phi = \Delta\Omega$라고 놓고 식(7)에 식(10), 식(11), 식(12)를 대입하여 풀면 다음과 같은 로터 회전 속도에 대한 운동 방정식을 유도할 수 있다.

$$[J_d]\Phi'' + \left[\frac{1}{\Omega_{rated}}\left(-\frac{\partial P}{\partial \beta}\right)N_g K_p - \frac{P_{rated}}{\Omega_{rated}^2}\right]\Phi' + \left[\frac{1}{\Omega_{rated}}\left(-\frac{\partial P}{\partial \beta}\right)N_g K_i\right]\Phi = 0 \quad (13)$$

여기서 PI 제어기로 제어되는 로터의 회전 속도는 2차 시스템으로서 반응할 것임을 알 수 있다. 이 시스템의 고유 주파수(natural frequency) ω_n와 제동비(damping ratio) ζ는 다음과 같다.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{J_d}{\frac{1}{\Omega_{rated}}\left(-\frac{\partial P}{\partial \beta}\right)N_g K_i}} \quad (14)$$

$$\zeta = \frac{\frac{1}{\Omega_{rated}}\left(-\frac{\partial P}{\partial \beta}\right)N_g K_p - \frac{P_{rated}}{\Omega_{rated}^2}}{2\sqrt{\left[\frac{1}{\Omega_{rated}}\left(-\frac{\partial P}{\partial \beta}\right)N_g K_i\right]J_d}} \quad (15)$$

위의 두 식에서 비례이득 K_p와 적분이득 K_i를 구하면 다음과 같이 블레이드 피치각에 따른 전력의 민감도($\frac{\partial P}{\partial \beta}$)의 함수로 구할 수 있다.

$$K_p = \frac{2J_d\Omega_{rated}\zeta\omega_n}{N_g\left(-\frac{\partial P}{\partial \beta}\right)} \quad (16)$$

$$K_i = \frac{J_d\Omega_{rated}\omega_n^2}{N_g\left(-\frac{\partial P}{\partial \beta}\right)} \quad (17)$$

즉, 피치각에 따라 PI 이득이 변하여 제어기는 전 영역에서 동작하게 된다. 여기에서 사용되는 파라미터 값들은 NREL에서 제공하는 자료를 사용하였으며 그 값들은 Table 1과 같다[6].

표 1. 5MW 육상 풍력발전기의 파라미터
Table 1. Parameters for 5MW onshore Wind Turbine

$J_d\ [kg.m^2]$	4.047e+07
$\Omega_{rated}\ [rad/s]$	1.2671
N_g	97
ω_n	0.6
ζ	0.7

3.2.2 PID 제어기 설계

마지막으로 미분이득을 구하기 위해 다음과 같은 PID 제어기의 전달 함수를 나타내면 다음과 같다.

$$G_c(s) = K_p\left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right) = \frac{K(s+a)(s+b)}{s} \quad (18)$$

흔히 $a=b$ 로 선정하여 $G_c(s)$를 구하면

$$G_c(s) = \frac{K(s+\alpha)^2}{s} \quad (19)$$

가 된다. 위와 같이 식을 변형한 이유는 PID제어기의 매개변수의 수가 3개인 점을 고려하여 이를 2개로 만들기 위해서 이다. 이와 같은 단순화를 통해서 미분이득을 구하면 다음과 같다.

$$K_p = 2K\alpha \quad K_i = K\alpha^2 \quad K_d = K \quad (20)$$

고로 K_d 또한 식(16)과 식(17)을 이용하여 다음과 같이 블레이드 피치각에 따른 전력의 민감도의 함수로 표현할 수 있다.

$$K_d = \frac{J_d\Omega_{rated}\zeta^2}{N_g\left(-\frac{\partial P}{\partial \beta}\right)} \quad (21)$$

4. 시뮬레이션 및 결과

시뮬레이션은 NREL에서 제공한 5[MW]급 풍력 터빈을 사용하였다. 전 장에서 설계한 PID 제어기를 이 모델에 추가하여 시뮬레이션을 수행하였으며, NREL에서 제공하는 풍력 터빈의 대한 사양은 Table 2와 같다.

표 2. NREL 5MW 육상 풍력발전기의 사양
Table 2. Specs of NREL 5MW onshore Wind Turbine

Rating	5 MW
Rotor, Hub Diameter	126 m, 3 m
Hub Height	90 m
Cut-In Wind Speed	3 m/s
Rated Wind Speed	11.4 m/s
Cut-Out Wind Speed	25 m/s
Cut-In Rotor Speed	6.9 rpm,
Rated Rotor Speed	12.1 rpm
Rated Tip Speed	80 m/s
Rotor Mass	110,000 kg
Nacelle Mass	240,000 kg
Tower Mass	347,460 kg

정격풍속이 11.4$[m/s]$이므로 정격풍속이하 즉 풍속이 11.4$[m/s]$이하에서는 바람 에너지의 회수 효율이 최대가 되도록 피치각은 0[deg]을 유지한다. 서서히 풍속이 정격풍속에 도달하면 발전기 회전 속도도 정격회전속도 122.9 $[rad/s]$에 이르게 된다. 정격풍속이상에서는 발전기의

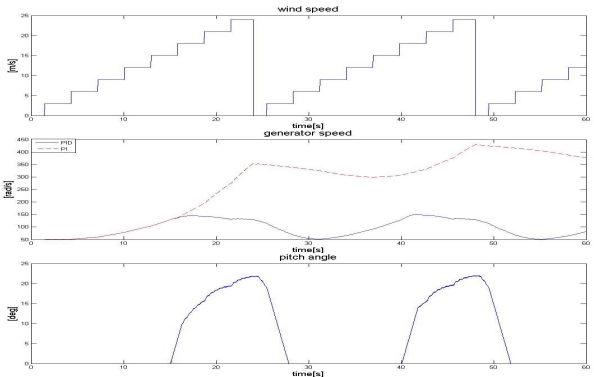

그림 4. 피치 PID 제어기를 사용한 풍력발전기의 시뮬레이션
Fig. 4. Simulation of Wind Turbine with Pitch PID

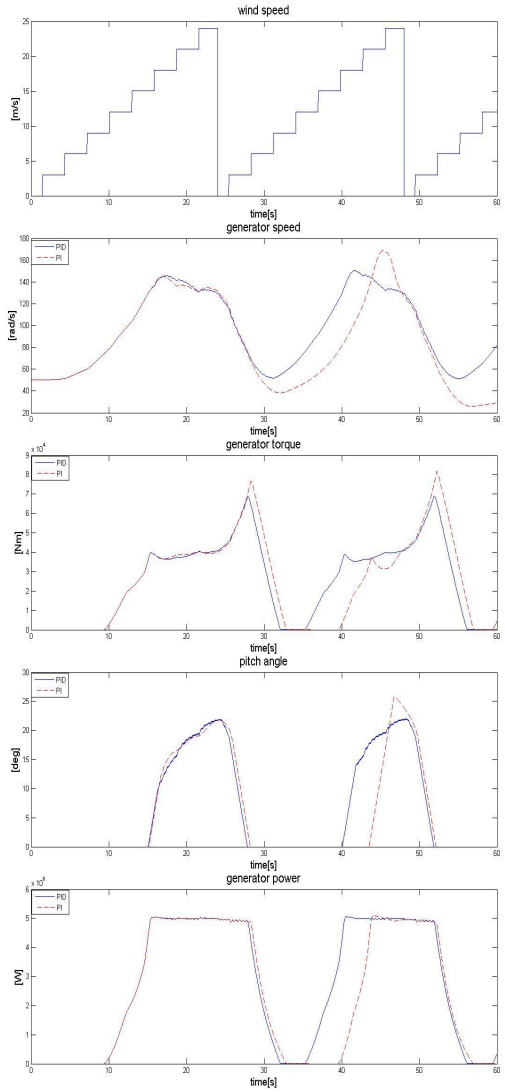

그림 5. PI와 PID제어기를 사용한 풍력발전기의 시뮬레이션 비교

Fig. 5. Comparison of Simulations of Wind Turbine with PI and PID Controller

Controller 회전속도를 유지하기 위하여 PID제어기는 피치각을 증가시켜 바람에너지 회수효율을 낮추게 된다. 그림. 4는 반복적으로 증가하는 풍속에서 정격풍속이하와 이상에서 PID제어기를 사용한 경우에 정상적으로 피치제어가 이루어지고 있음을 보여준다. 즉 정격풍속이상에서는 피치각을 제어하여 전기발전기의 회전속도를 제어하고 있음을 알 수 있다.

그림 5는 PI제어기를 적용하여 제어가 이루어지는 경우와 PID제어기를 적용하여 제어가 이루어지는 경우를 비교한 것이다. 풍속은 앞의 풍속과 동일하다. 미분이득이 추가됨으로서 풍속이 급격히 떨어질 때 발전기 회전속도를 비교해 보면 PI제어 보다 PID제어가 이루어지는 경우가 변동이 심하지 않음을 알 수 있다. 발전기 토크 또한 풍속이 급격히 떨어질 때 변동 폭이 크지 않고 회복이 빠르게 이루어 짐을 알 수 있다. 결과적으로 발전기 출력량이 PI제어보다 PID제어가 이루질 때 더 증가하는 것을 확인할 수 있다.

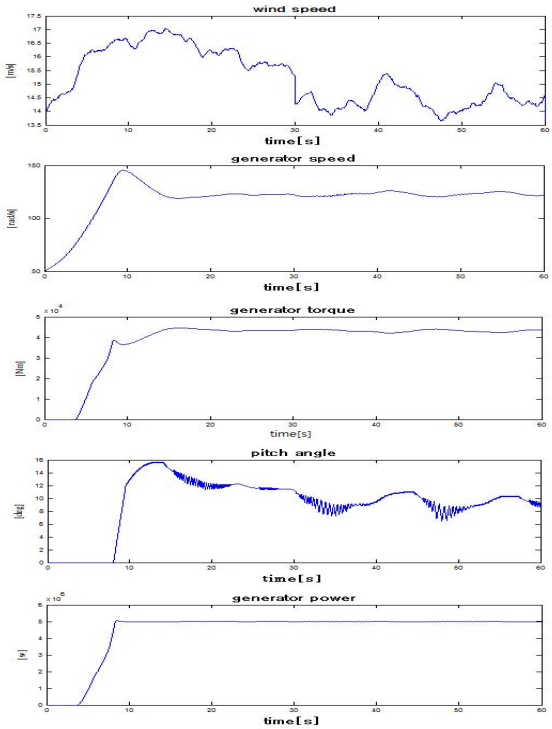

그림 6. 정격이상의 연속풍속모델에서 시뮬레이션 결과

Fig. 6. Simulation Results of Over Rated Continuous Wind Speeds

그림 6은 정격이상에서 연속적으로 변하는 풍속모델에서 시뮬레이션하기 위하여 중심풍속이 $14[m/s]$이고 편차가 $\pm 3[m/s]$인 풍속을 랜덤숫자를 이용하여 생성하였다. 사용된 풍속은 정격 풍속 이상이므로 피치각의 변화가 있음을 알 수 있다. 0초에서 10초 사이에 피치각이 0[deg]인 이유는 아직 발전기 회전 속도가 정격이 아니기 때문이다. 발전기 회전 속도는 약 10초 전후로 해서 과속도가 나오지만 빠르게 정격 속도로 회복되는 것을 확인 할 수 있다. 발전기 토크 또한 일정한 값을 유지하는 것을 확인할 수 있다. 그에 따라서 발전기 출력 또한 일정하게 유지되고 있다. 피치각은 풍속의 크기에 따라 움직이고 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 5MW급 풍력 터빈 시스템을 구성하고, 그에 적합한 피치 제어를 위한 가변적인 PID 이득 제어기를 설계하였다. 공기 역학적인 모델은 5MW급에 맞게 설계되었고, 드라이브 트레인 모델은 Two-Mass 모델로 구성하였다. 그리고 발전기 모델은 단순히 발전기 효율을 가정하여 효율치만 곱한 형태로 나타내었다.

그리고 PID제어기 설계를 위하여 풍력발전기의 동력전달모델을 단일자유도 방정식으로 유도하였다. 이 방정식을 이용하여 PID 이득을 블레이드 피치각에 따른 전력의 민감도의 함수로 표현하였다. 즉 PID 이득이 피치각에 따라 변하게 하여 피치각의 전 영역에서 시스템이 동작하게 하였다.

시뮬레이션 결과를 통해서 PID제어가 적절하게 이루어짐을 확인 할 수 있다. 정격이상의 연속적으로 변하는 풍속을 적용한 시뮬레이션에서 피치제어의 상태가 부분적으로

적절치 않은 상태가 발견되었지만 전체적으로 양호한 결과를 보였다. 이런 부분적인 문제들은 향후의 연구를 통해서 해결될 것으로 기대된다.

References

[1] Ho-Chan Kim, *Study on implementation of control algorithm for small-scale wind power system*, Basic Electric Engineering Research Institute, 1998.

[2] Maureen Hand. M, *Systematic Control Design Methodology for Variable-Speed Wind Turbine*, Technical Report of National Renewable Energy Laboratory, Colorado USA, 2002.

[3] Sakamoto. R, Senjyu. T, "Output ower Leveling of Wind Turbine Generator for All Operating Regions by Pitch Angle Control", *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp.2274-2281, 2005.

[4] Fernando D.Bianchi,Hernan De Battista,Ricardo J.Mantz, *Wind Turbine Control Systems*, Springer, 2007.

[5] E.Hau, *Windturbines: Fundamentals, Technologies, Application and Economics*, Springer, 2005.

[6] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, and G. Scott, *Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development*, Technical Report NREL/TP-500-38060, 2009.

저 자 소 개

고정민(Jung-Min Ko)
2003년 : 제주대학교 전자공학과 학사
2010년～현재 : 제주대학교 풍력 특성화 협동과정 석사

관심분야 : 피치 제어, 풍력 발전 제어
Phone : +82-64-754-3666
E-mail : eshkohsm@naver.com

양수형(Su-Hyung Yang)
2008년 : 제주대학교 전기공학과 공학사
2010년～현재 : 제주대학교 풍력특성화 협동과정 석사

관심분야 : 퍼지제어, 풍력발전제어
Phone : +82-64-754-3797
E-mail : tngud84@jejunu.ac.kr

부창진(Chang-Jin Boo)
2001년 : 제주대학교 전기공학과 학사
2003년 : 제주대학교 전기공학과 석사
2007년 : 제주대학교 전기공학과 공학박사

관심분야 : 에너지관리, 접지시스템
Phone : +82-64-754-3797
E-mail : boo1004@jejunu.ac.kr

김호찬(Ho-Chan Kim)
1987년 : 서울대학교 제어계측공학과 공학사
1994년 : 서울대학교 제어계측공학과 공학박사
1995년～현재 : 제주대학교 전기공학과 교수

관심분야 : 퍼지제어, 풍력발전제어
Phone : +82-64-754-3676
E-mail : hckim@jejunu.ac.kr

이정훈(Junghoon Lee)
1988년 : 서울대학교 컴퓨터공학과 학사
1994년 : 서울대학교 컴퓨터공학과 박사
1996년～현재 : 제주대학교 전산통계학과 교수

관심분야 : 스마트그리드, 실시간통신
Phone : +82-64-754-3594
E-mail : jhlee@jejunu.ac.kr

허종철(Jong-Chul Huh)
1982년 : 인하대학교 기계공학과 석사
1992년 : 인하대학교 기계공학과 박사
1984년～현재: 제주대학교 기계시스템공학부 교수

관심분야 : 풍력발전시스템
Phone : +82-64-754-3623
E-mail : jchuh@jejunu.ac.kr

강민제(Min-Jae Kang)
1982년 : 서울대학교 전기공학과 공학사
1991년 : 루이빌대 전기 공학과 공학박사
1992년～현재 : 제주대학교 전자공학과 교수

관심분야 : 접지시스템, 풍력발전제어
Phone : +82-64-754-3666
E-mail : minjk@jejunu.ac.kr