

풍력터빈 토크제어의 특성 고찰

A Study on Properties of Torque Control for Wind Turbine

임 채 옥*
(Chae-Wook Lim)

Abstract: The aerodynamic torque and power caused by the interaction between the wind and blade of wind turbine are highly nonlinear. For this reason, the overall dynamic behaviors of wind turbine have nonlinear characteristics. The aerodynamic nonlinearity also affects properties of torque control for wind turbine. In this paper, the nonlinear aerodynamic property according to the wind speed below rated power and its effects on the torque control system are investigated. Nonlinear parameter representing change of aerodynamic torque with respect to rotor speed is obtained by linearization technique. Effects of this aerodynamic nonlinear parameter on the closed-loop torque system with PI controller for an 1.5 MW wind turbine are presented.

Keywords: wind turbine, torque control, aerodynamic torque, nonlinearity, linearization, closed-loop system

I. 서론

풍력터빈은 바람이 가진 에너지를 블레이드 회전을 통하여 기계적 에너지로 전환하고, 발전기 제어를 통하여 전기를 생산하는 기계이다. 최근 풍력터빈은 대형화되는 추세로 수 MW급이 시장의 주류를 형성하고 있고, 오늘날 대부분은 가변속도 가변피치(variable-speed variable-pitch) 형태를 취하고 있다[1,2]. 과거 소규모의 풍력터빈은 발전기의 회전속도가 거의 일정한 고정속도 형태의 유도 발전기를 사용하였고, 또한 로터 블레이드의 피치각을 고정하여 사용하는 형태를 취하였다. 최근 풍력터빈이 수 MW급으로 대형화되면서 인버터 기술 등의 발전으로 DFIG (Doubly-Fed Induction Generator)나 PMG (Permanent Magnet Generator)를 사용하여 발전기의 회전속도를 제어하는 것이 가능하게 되었다[3-5]. 풍력터빈에서는 토크제어를 통하여 발전기의 회전속도와 토크입력을 제어하게 된다.

풍력터빈의 제어에 있어서 중요하게 고려되어야 할 사항은 바람과 블레이드의 상호작용에 의한 공기역학적 토크의 비선형성이다. 풍력터빈은 공기역학적 토크의 비선형성으로 인해 블레이드, 로터, 회전축, 기어박스, 타워, 발전기 등 풍력터빈의 각 구성요소들을 선형모델로 가정하더라도 풍력터빈의 전체 거동은 비선형적인 거동을 보이게 된다[5,6]. 풍력터빈의 토크제어기는 선형 제어기 또는 비선형 제어기의 형태로 설계되어 실제의 풍력터빈에 적용되고 있다[7,8]. 풍력터빈의 토크제어기의 설계에 관한 연구결과들이 논문과 보고서 등을 통하여 발표되고 있지만[7-11], 공기역학적 비선형성이 토크제어에 미치는 영향에 대한 연구결과는 아직 제시되지 않았다. 그러므로 본 연구에서는 바람과 블레이드의 상호작용에 의한 비선형성이 풍력터빈의 전체 거동과 토크제어에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 이를 위하여 먼저 비선형인 공기역학적 토크를 선형화하여 로터속도

에 대한 공기역학적 토크의 변화를 나타내는 비선형 파라미터를 구하는 식을 유도한다. 그리고 1.5 MW급 풍력터빈을 대상으로 이 비선형 파라미터가 폐루프계의 토크제어의 특성에 미치는 영향을 각각 보이고자 한다.

II. 공기역학적 토크의 비선형성

바람과 로터 블레이드의 상호작용에 의한 공기역학적 출력과 토크는 식 (1), (2)와 같이 각각 무차원 계수들(C_P , C_Q)을 사용하여 풍속의 함수로 표현된다[5,6].

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

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

여기서 ρ 는 공기밀도, R 은 블레이드 길이, β 는 블레이드 피치각, V 는 풍속, C_P 는 출력계수, C_Q 는 토크계수, λ 는 주속비(TSR: tip speed ratio)로 식 (3)과 같이 정의된다.

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

여기서 Ω_r 은 로터속도이다.

그리고 출력계수와 토크계수는 주속비를 이용하면 식 (4)와 같은 관계로 표현된다.

$$C_Q = \frac{C_P}{\lambda} \quad (4)$$

본 논문에서 사용된 출력계수는 그림 1과 같은데, 주속비와 피치각의 함수이며 최대값($C_{P,max}$)을 가지는 한 점이 존재함을 알 수 있다. $C_{P,max}$ 가 되게 하는 주속비와 피치각의 값을 각각 λ_{opt} 과 β_{opt} 로 두면, 그림 1의 경우 $\lambda_{opt} = 6.6$, $\beta_{opt} = 0.4^\circ$ 이고 이에 대한 $C_{P,max} = 0.4635$ 이다.

풍력터빈의 토크제어기는 정격출력 이하에서 작동하는 것이므로, 정격풍속 이하에서는 블레이드 피치각은 일정한

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 9. 10., 수정: 2009. 10. 5., 채택확정: 2009. 10. 30.

임채옥: 한밭대학교 기계공학과(cwlim@hanbat.ac.kr)

* 본 논문은 지식경제부의 지원으로 수행한 연구결과임.

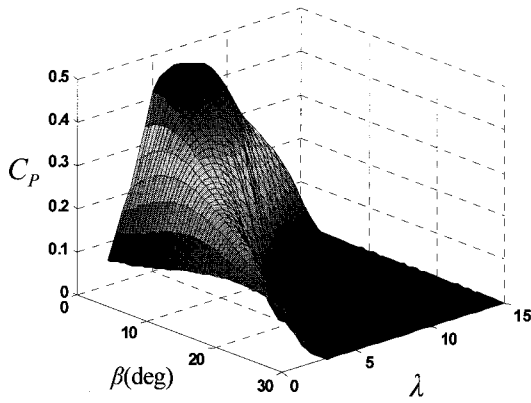


그림 1. 주속비 및 피치각에 따른 출력계수.
Fig. 1. Power coefficient according to TSR and pitch angle.

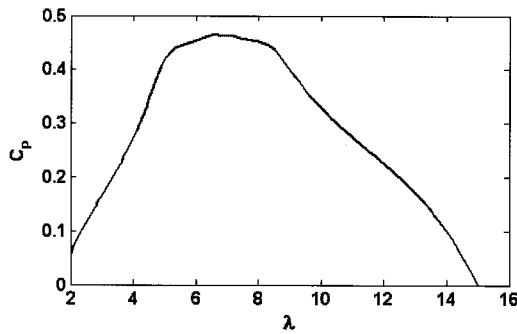


그림 2. $\beta = 0.4^\circ$ 일 때 주속비에 따른 출력계수.
Fig. 2. Power coefficient according to TSR at $\beta = 0.4^\circ$.

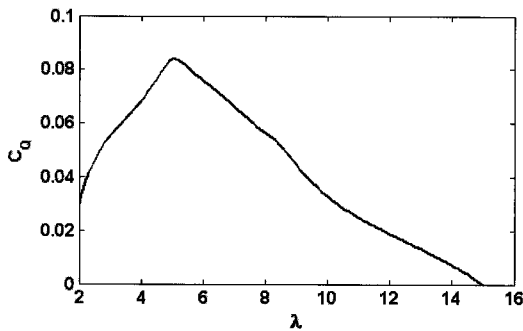


그림 3. $\beta = 0.4^\circ$ 일 때 주속비에 따른 토크계수.
Fig. 3. Torque coefficient according to TSR at $\beta = 0.4^\circ$.

값인 β_{opt} 로 항상 유지한다. 그러므로 정격풍속 이하에서의 출력계수 및 토크계수는 그림 2와 그림 3에서와 같이 주속비에 대하여 비선형적인 함수로 표현된다.

III. 공기역학적 토크의 선형화와 비선형 파라미터

1. 동작점 구하기

바람과 블레이드의 상호작용에 의한 비선형성으로 인해 풍력터빈의 동특성을 파악하고 정밀한 제어기의 설계를 위해서는 공기역학적 비선형성을 선형화할 필요가 있다. 선형화를 위해서는 동작점이 먼저 선정되어야 하는데, 가변속도-가변피치 풍력터빈의 경우 비선형적인 공기역학적 토크의

선형화를 위해서는 동작 풍속(V_o)에 따른 로터속도와 피치각 모두에 대한 동작점(Ω_{ro}, β_o)의 선정이 필요하다. 이들 동작점들은 수립되는 제어전략을 바탕으로 풍력터빈의 출력, 로터속도, 피치각의 제한조건 정보들을 고려하여 구하게 된다[5]. 본 논문에서는 정격풍속 이하에서 작동하는 토크제어기에 대하여 살펴보고자 하므로, 이 경우에 피치각의 동작점 $\beta_o = \beta_{opt}$ 로 고정된다.

2. 공기역학적 토크의 선형화

로터속도, 피치각, 풍속에 대한 동작점(O_p)을 식 (5)와 같이 두고, 이들 동작점 근처에서의 로터속도, 피치각, 풍속의 변화를 각각 $\delta\Omega_r, \delta\beta, \delta V$ 로 두면, 식 (2)의 비선형적인 공기역학적 토크는 식 (6)과 같이 선형화가 가능하다.

$$O_p = \{\Omega_{ro}, \beta_o, V_o\} \tag{5}$$

$$T_r = T_{r_o} + \delta T_r \tag{6}$$

여기서 $T_{r_o} = T_r|_{O_p}$ 로 동작점들에서의 공기역학적 토크이고, δT_r 은 동작점들 근처에서의 공기역학적 토크의 변화로 식 (7)과 같다.

$$\delta T_r = \left. \frac{\partial T_r}{\partial \Omega_r} \right|_{O_p} \cdot \delta \Omega_r + \left. \frac{\partial T_r}{\partial \beta} \right|_{O_p} \cdot \delta \beta + \left. \frac{\partial T_r}{\partial V} \right|_{O_p} \cdot \delta V \tag{7}$$

3. 토크제어와 관련된 공기역학적 비선형 파라미터

정격풍속 이하에서는 피치각의 동작점 $\beta_o = \beta_{opt}$ 로 고정되어 있으므로 피치각에 대한 공기역학적 토크의 변화는 없다. 토크제어의 특성을 파악하기 위해서는 로터속도에 대한 공기역학적 토크의 변화를 알아야 하므로, 이를 식 (8)과 같이 둔다. 공기역학적 토크를 로터속도에 대하여 편미분한 값은 풍력터빈에 물리적으로 감쇠의 역할을 하므로, (-) 부호를 이용하여 표현하였다.

$$N_{\Omega_r} = - \left. \frac{\partial T_r}{\partial \Omega_r} \right|_{O_p} \tag{8}$$

로터속도에 대한 공기역학적 토크의 변화를 나타내는 N_{Ω_r} 은 출력계수를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다. 식 (3)의 주속비를 로터속도에 대하여 편미분하면 식 (9)와 같다.

$$\frac{\partial \lambda}{\partial \Omega_r} = \frac{R}{V} \tag{9}$$

출력계수를 로터속도에 대하여 편미분한 후 식 (9)를 이용하면 식 (10)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial C_P}{\partial \Omega_r} = \frac{\partial C_P}{\partial \lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial \Omega_r} = \frac{R}{V} \frac{\partial C_P}{\partial \lambda} \tag{10}$$

식 (2)의 공기역학적 토크를 식 (4)를 이용하여 출력계수의 항으로 표현하고 로터속도 대하여 편미분한 후 식 (10)을 이용하면 식 (11)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial T_r}{\partial \Omega_r} = \frac{1}{2} \pi \rho R^2 \left[- \frac{V^3}{\Omega_r^2} C_P + \frac{R V^2}{\Omega_r} \frac{\partial C_P}{\partial \lambda} \right] \tag{11}$$

그러므로 식 (11)을 이용하면 식 (8)의 N_{Ω} 을 구할 수 있다.

풍력터빈의 정격풍속 이하에서의 제어목표는 최대의 출력을 생산하도록 하는 것인데, 이를 위하여 토크제어기를 통하여 출력계수를 $C_{P,max}$ 로 유지하도록 제어한다. 출력계수를 $C_{P,max}$ 로 유지하기 위해서는 풍속이 커질수록 로터의 회전속도를 선형적으로 증가시켜 주속비가 λ_{opt} 이 되도록 제어해야 한다. 그러므로 정격풍속 이하에서 로터속도가 정격속도에 이르기 전까지는 주속비의 변화에 대한 출력계수의 변화는 없으므로 식 (10), (11)에서 $\partial C_P / \partial \lambda$ 의 값은 항상 0이다.

IV. 토크 제어의 특성

1. 풍력터빈 모델

본 논문에서는 정격풍속 이하에서 풍력터빈의 토크제어의 특성을 살펴보기 위해서 그림 4와 같은 풍력터빈 시스템을 고려한다. 드라이버-트레인의 거동은 로터의 감쇠와 기어박스의 기어비를 고려하고 회전축의 강성과 감쇠는 고려하지 않는다. 그리고 토크제어를 위한 되먹임 신호는 발전기의 회전속도를 고려한다. 그림 4에서 T_r 은 로터를 회전시키는 공기역학적 토크, T_g 는 발전기 토크, J_r 은 로터의 관성 모멘트, J_g 는 발전기의 관성 모멘트, B_r 은 로터의 감쇠, n_{gb} 는 기어박스의 기어비이다.

그림 4와 같이 기어박스가 있는 풍력터빈의 경우 풍력터빈의 동적거동을 표현하는 미분방정식은 로터속도 또는 발전기 속도를 상태로 둘 수 있다. 본 논문에서는 발전기 속도를 상태로 둔 경우를 고려하는데, 운동 방정식은 식 (12)와 같이 1차 미분방정식으로 표현된다.

$$J_e \dot{\Omega}_g(t) + B_e \Omega_g(t) = T_e(t) - T_g(t) \quad (12)$$

여기서 Ω_g 는 발전기 속도이고, J_e , B_e , T_e 는 각각 등가의 관성 모멘트, 등가의 감쇠, 등가의 공기역학적 토크로 식 (13)과 같다.

$$\begin{aligned} J_e &= J_g + \frac{J_r}{n_{gb}^2} \\ B_e &= \frac{B_r}{n_{gb}^2} \\ T_e &= \frac{T_r}{n_{gb}} \end{aligned} \quad (13)$$

발전기 속도의 동작점(Ω_{g0}) 근처에서의 변화를 $\delta\Omega_g$, 발전기 토크의 동작점(T_{g0}) 근처에서의 변화를 δT_g 로 두고, 식 (2)의 비선형적인 공기역학적 토크를 선형화한 결과를 이용하면, 식 (12)는 식 (14)와 같이 선형화된다.

$$J_e \delta \dot{\Omega}_g(t) + (B_e + B_{\Omega_g}) \delta \Omega_g(t) = -\delta T_g(t) \quad (14)$$

여기서 $B_{\Omega_g} = N_{\Omega_r} / n_{gb}^2$ 이다.

본 논문에서는 정격출력은 1.5 MW, 로터 정격속도는 20 rpm, 출력계수는 그림 1과 같이 비선형적인 공기역학적 특성을 갖는 가변속도 가변피치 형태의 풍력터빈에 대하여

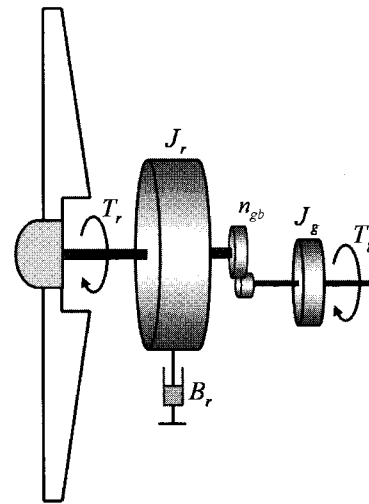


그림 4. 풍력터빈 모델.

Fig. 4. A model of wind turbine.

표 1. 1.5 MW 풍력터빈의 물리적 파라미터 값들.

Table 1. Physical parameter values of an 1.5 MW wind turbine.

Physical parameters	Values
R	33.25 m
J_r	3.357e6 kgm ²
J_g	60 kgm ²
B_r	5.44e3 m ² /s
n_{gb}	90

살펴보고자 한다. 풍력터빈의 파라미터 값들은 표 1과 같고, 이 경우 등가의 관성 모멘트 $J_e = 474.4444 \text{ kgm}^2$, 등가의 감쇠 $B_e = 0.6716 \text{ m}^2/\text{s}$ 로 계산된다. 풍력터빈이 작동하는 풍속은 시동풍속(cut-in wind speed)이 3 m/s이고 정지풍속(cut-out wind speed)이 24 m/s인 경우를 고려하였다. 가변속도 가변피치 풍력터빈의 제어전략을 적용하면 정격출력이 되는 정격풍속은 11.6 m/s로 계산된다.

2. 토크제어의 특성 확인

식 (14)를 발전기 토크입력과 발전기 회전속도 사이의 전달함수로 표현하면 식 (15)와 같다.

$$G_g(s) = \frac{\delta \Omega_g(s)}{\delta T_g(s)} = \frac{-1}{J_e s + (B_e + B_{\Omega_g})} \quad (15)$$

표 1의 1.5 MW의 풍력터빈의 경우 동작풍속(V_o)에 따른 공기역학적 비선형 파라미터 값(B_{Ω_g})을 구하면 표 2의 결과를 얻게 되는데, B_{Ω_g} 의 값은 풍속에 비례하여 커짐을 확인할 수 있다. 식 (15)의 토크제어 전달함수의 풍속에 따른 주파수 응답은 그림 5와 같다. 주파수 응답은 바람과 블레이드의 상호작용으로 인해 비선형적인 특성을 보임을 확인할 수 있는데, 비선형적인 특성은 일정 주파수(약 0.1 Hz) 이하에서 크게 나타남을 확인할 수 있다.

풍력터빈의 발전기 토크입력을 제어하기 위한 되먹임 제어 구조는 토크제어루프 형태나 속도제어루프 형태 모두 가능하다. 토크제어루프의 경우 주로 소형 풍력터빈에 많이

표 2. 풍속에 따른 비선형 파라미터 값.

Table 2. Nonlinear parameter value according to wind speed.

V_o (m/s)	B_{Ω_g} (m ² /s)
3	9.2716
4	12.3580
5	15.4444
6	18.5432
7	21.6296
8	24.7160
9	27.8025
10	30.9012
11	29.1852
12	34.1235

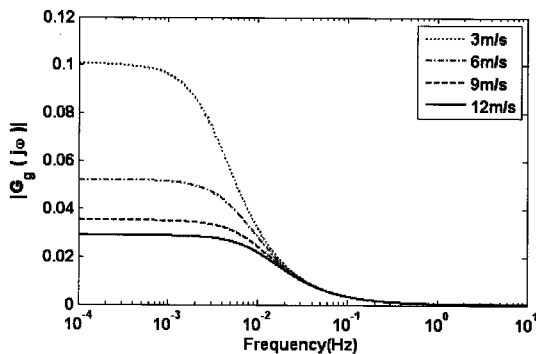


그림 5. 토크제어계 전달함수의 풍속에 따른 주파수 응답.

Fig. 5. Frequency responses of transfer function for torque control system according to wind speed.

적용되고 있으나, 로터의 관성 모멘트가 큰 대형 풍력터빈에는 제어효과가 좋지 않아 적용이 많이 되지 않는다[4]. 최근 수 MW급의 대형 풍력터빈에는 주로 속도제어루프 형태가 사용되고 있는데, 로터의 관성 모멘트가 큰 경우에도 토크제어기의 응답속도를 빠르게 할 수 있는 장점이 있다[5]. 본 논문에서는 그림 6과 같이 속도제어루프 형태의 토크제어기 구조를 가지는 경우를 고려하고, 토크제어기는 식 (16)의 PI 제어기를 적용하여 바람과 블레이드의 상호작용에 의한 비선형성이 페루프계에 미치는 영향을 살펴본다.

$$C_g(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \tag{16}$$

회전속도 기준입력(Ω_{ref})과 발전기 회전속도 사이의 페루프계 전달함수는 식 (17)과 같다.

$$G_c(s) = \frac{\delta\Omega_g(s)}{\delta\Omega_{ref}(s)} = \frac{K_p s + K_i}{J_e s^2 + (B_e + B_{\Omega_g} + K_p)s + K_i} \tag{17}$$

페루프계의 두 극점의 고유진동수(ω_n)와 감쇠비(ζ)는 식 (18), (19)와 같다.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_i}{J_e}} \tag{18}$$

$$\zeta = \frac{B_e + B_{\Omega_g} + K_p}{2\sqrt{J_e K_i}} \tag{19}$$

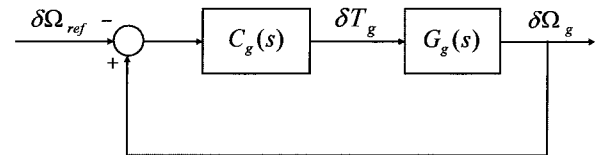


그림 6. 속도제어루프 형태의 토크제어기.

Fig. 6. Torque controller with speed control loop.

표 3. 페루프계의 감쇠비.

Table 3. Damping ratios of the closed-loop system.

V_o (m/s)	ζ	
	Case 1: $f_n = 0.01 Hz$	Case 2: $f_n = 0.1 Hz$
3	0.500	0.600
4	0.552	0.605
5	0.604	0.610
6	0.656	0.616
7	0.707	0.621
8	0.759	0.626
9	0.811	0.631
10	0.863	0.636
11	0.834	0.633
12	0.917	0.642

그러므로 바람과 블레이드의 상호작용에 의해 결정되는 B_{Ω_g} 는 페루프계 영점과 극점의 고유진동수에는 영향을 주지 않지만 극점의 감쇠비에는 영향을 줄 수 있다.

표 1의 1.5 MW의 풍력터빈을 대상으로 두 가지 경우의 PI 제어기인 값을 적용하여 풍속에 따른 감쇠비를 구하면 표 3의 결과를 얻게 된다. 첫 번째 경우는 시동풍속 3 m/s에서 극점의 고유진동수는 0.01 Hz이고 감쇠비는 0.5가 되도록 제어기인 값($K_p=19.8694$, $K_i=1.8730$)을 결정하였다. 두 번째 경우는 시동풍속 3 m/s에서 극점의 고유진동수는 0.1 Hz이고 감쇠비는 0.6이 되도록 제어기인 값($K_p=347.7818$, $K_i=187.3032$)을 결정하였다. 그림 5의 토크제어계의 주파수 응답에서 보여주는 것처럼, 첫 번째 경우의 극점의 고유진동수는 B_{Ω_g} 의 비선형성이 토크제어계의 비선형성에 많은 영향을 주는 주파수이고, 두 번째 경우의 극점의 고유진동수는 B_{Ω_g} 의 비선형성이 토크제어계의 비선형성에 거의 영향을 주지 않는 주파수이다. 첫 번째 경우는 풍속이 커질수록 페루프계의 감쇠비가 크게 증가하는 반면, 두 번째 경우는 풍속이 커져도 감쇠비의 변화는 작음을 확인할 수 있다. 두 경우에 대한 주파수 응답과 단위계단 응답은 그림 7-10과 같다. 첫 번째 경우는 페루프계의 특성이 풍속에 따라 비선형적이지만, 두 번째 경우는 페루프계가 거의 선형적인 특성을 보임을 확인할 수 있다. 이로부터 바람과 블레이드의 상호작용으로 인한 비선형성은 페루프계 극점의 고유진동수가 작아질수록 커짐을 알 수 있고, 여기에서 고려된 1.5 MW급 풍력터빈의 경우 일정 주파수(약 0.1 Hz) 이하에서 비선형성의 영향이 크게 나타남을 확인할 수 있다. 그러므로 토크제어기의 설계 시에 페루프계 극점의 고유진동수를 크게 할 수 있도록 발전기의 토크입력을

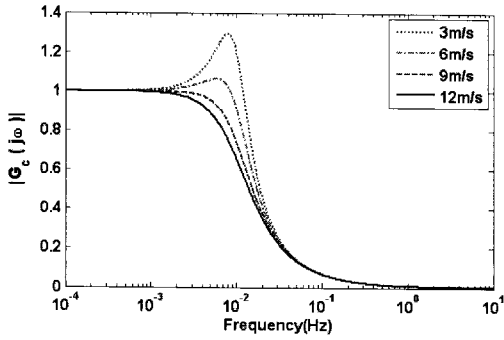


그림 7. 풍속에 따른 폐루프계의 주파수 응답: 경우 1.
 Fig. 7. Frequency responses of the closed-loop system according to wind speed: Case 1.

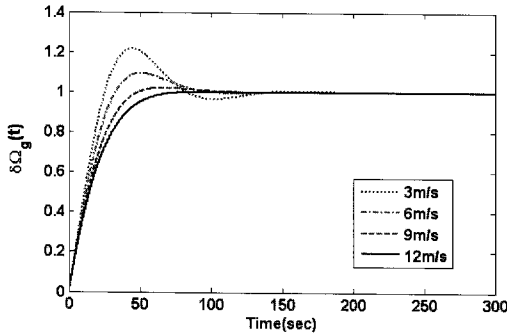


그림 8. 풍속에 따른 폐루프계의 단위계단 응답: 경우 1.
 Fig. 8. Unit step responses of the closed-loop system according to wind speed: Case 1.

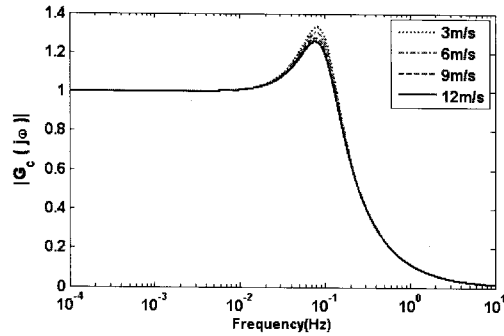


그림 9. 풍속에 따른 폐루프계의 주파수 응답: 경우 2.
 Fig. 9. Frequency responses of the closed-loop system according to wind speed: Case 2.

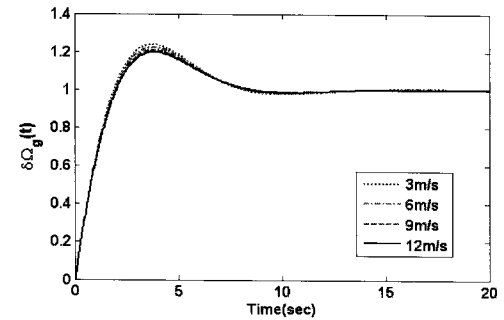


그림 10. 풍속에 따른 폐루프계의 단위계단 응답: 경우 2.
 Fig. 10. Unit step responses of the closed-loop system according to wind speed: Case 2.

충분히 조절할 수 있다면, 바람과 블레이드의 상호작용으로 인한 비선형성의 영향을 제거할 수 있음을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 풍력터빈의 공기역학적 토크의 비선형성이 정격출력 이하에서 작동하는 토크제어에 미치는 영향을 살펴보았다. 이를 위하여 토크제어의 특성에 영향을 주는 비선형 파라미터를 선형화를 통하여 구하였고, 1.5 MW급 가변속도 가변피치 풍력터빈에 대한 예를 통하여 비선형 파라미터가 폐루프계에 미치는 영향을 살펴보았다. 토크제어기는 속도제어루프 형태의 PI 제어기를 고려하여 공기역학적 비선형성의 영향을 확인하였다. 공기역학적 비선형성은 폐루프계의 영점과 극점의 고유진동수에는 전혀 영향을 주지 않지만 극점의 감쇠비에 영향을 줄 수 있었고, 이로 인해 폐루프계는 풍속이 커질수록 감쇠비가 커지는 비선형적인 특성을 보임을 확인하였다. 그리고 폐루프계 극점의 고유진동수를 크게 할 수 있도록 발전기의 토크입력을 충분히 조절할 수 있다면, 공기역학적 비선형성의 영향은 제거될 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] A. D. Hansen and L. H. Hansen, "Wind turbine concept market penetration over 10 years (1995-2005)," *Wind Energy*, vol. 10, no. 1, pp. 81-97, 2007.
- [2] P. Sørensen, A. D. Hansen, F. Iov, F. Blaabjerg, and M. H. Donovan, "Wind farm models and control strategies," Technical Report RISØ-R-1464(EN), RISØ National Laboratory, Roskilde, Denmark, 2005.
- [3] L. H. Hansen, L. Helle, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. Munk-Nielsen, H. Bindner, P. Sørensen, and B. Bak-Jensen, "Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines," Technical Report RISØ-R-1205(EN), RISØ National Laboratory, Roskilde, Denmark, 2001.
- [4] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, and E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons, New-York, 2001.
- [5] F. D. Bianchi, H. D. Battista, and R. J. Mantz, *Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling and Gain Scheduling Design*, Springer-Verlag, London, 2007.
- [6] W. E. Leithead and B. Connor, "Control of variable speed wind turbines: dynamic models," *International Journal of Control*, vol. 73, no. 13, pp. 1173-1188, 2000.
- [7] B. Boukhezzer, L. Lupu, H. Siguerdidjane, and M. Hand, "Multivariable control strategy for variable speed, variable pitch wind turbines," *Renewable Energy*, vol. 32, pp. 1273-1287, 2007.
- [8] M. Hansen, A. Hansen, T. Larsen, S. Øye, P. Sørensen, and P. Fuglsang, "Control design for a pitch-regulated, variable speed wind turbine," Technical Report

RISØ-R-1500(EN), RISØ National Laboratory, Roskilde, Denmark, 2005.

- [9] S. Arnalite, J. C. Burgos, and J. L. Rodriguez-Amendo, "Direct torque control of a doubly-fed induction generator for variable speed wind turbines," *Electric power components and systems*, vol. 30, pp. 199-216, 2002.
- [10] G. Gail, A. D. Hansen, and T. Hartkopf, "Controller design and analysis of a variable speed wind turbine with doubly-fed induction generator," *European Wind Energy Conference*, Athen, Greece, 2006.
- [11] G. Michalke, A. D. Hansen, and T. Hartkopf, "Control strategy of a variable speed wind turbine with multipole

permanent magnet synchronous generator," *European Wind Energy Conference*, Brussels, Belgium, 2008.



임 채 욱

1998년 부산대학교 기계설계공학과 학사. 2000년 한국과학기술원 기계공학과 대학원 석사. 2006년 동 대학원 박사. 2007~현재 한밭대학교 기계공학과 교수. 관심분야는 자동제어, 제어이론, 포화제어, 강인제어, 능동진동제어 및

장치개발, 풍력터빈의 제어, 국방로봇의 제어.