

난류 풍속에 대한 MW급 풍력발전기의 토크 제어기 응답[§]

임 채 욱^{*†}

* 한밭대학교 기계공학과

Response of Torque Controller for a MW Wind Turbine under Turbulence Wind Speed

Chae-Wook Lim^{*}

* Dept. of Mechanical Engineering, Hanbat Nat'l Univ.

(Received July 19, 2016 ; Revised November 9, 2016 ; Accepted December 23, 2016)

Key Words: MW Wind Turbine(MW급 풍력발전기), Torque Controller(토크 제어기), Optimal Mode Gain(최적모드게인), Rotor Speed(로터 속도), Nonlinear Parameter(비선형 파라미터), Turbulence Wind Speed(난류 풍속), Generated Power(출력 파워)

초록: 정격풍속 이하에서 풍력발전기의 토크 제어기는 최대 출력 파워를 얻기 위하여 중요하다. 토크 제어의 주된 목적은 바람이 가진 에너지로부터 최대의 출력 파워를 얻도록 하는 것이다. 이를 위하여 최적모드게인을 이용하여 발전기 속도의 제곱에 비례하도록 발전기의 토크 크기를 조절하는 방법이 많이 적용되었다. 그러나 이 제어 방법은 풍력발전기가 수 MW급으로 대형화될수록 응답이 느려진다. 본 논문에서는 토크 제어기의 응답을 빠르게 하기 위하여 공력 토크의 로터 속도 비선형 파라미터를 제어게인으로 이용하여 추가적인 토크 크기를 조절하는 방법을 고려했다. 로터 속도 비선형 파라미터의 계산 시에 온라인 경우와 오프라인 경우를 각각 살펴보았다. 2MW 풍력발전기에 대하여 실제 난류 풍속에 대하여 수치실험을 수행하여 오프라인 경우가 출력 파워를 더 향상시키고 실용적임을 보인다.

Abstract: The main objective of a torque controller below rated wind speed is to extract maximum power from the potential wind energy. To do this, the torque control method, which adjusts the torque magnitude and makes it proportional to the square of the generator speed, has been applied. However, this method makes the response slower as the wind turbines are getting larger in size with multi-MW capacities. In this paper, a torque control method that uses the nonlinear parameter of rotor speed for aerodynamic torque as a control gain is discussed to improve the response by adjusting an additional torque magnitude. The nonlinear parameter of the rotor speed could be calculated both online and offline. It is shown that the offline case is more practical and effective in producing power through the numerical simulation of a 2MW wind turbine by considering the real turbulence wind speed.

1. 서론

지금 세계는 화석연료의 고갈과 환경오염의 결과로 인하여 신재생에너지의 관심이 급증하고 있는 실정인데, 그중에 풍력발전기는 바람이 가진

에너지로 로터 블레이드를 회전시켜 기계적인 에너지로 전환하여 발전기를 통하여 전기에너지로 전환하는 기계이다. 풍력발전기는 블레이드, 로터, 기어박스, 타워, 발전기, 피치시스템, 요잉시스템 등 수 천 개의 다양한 부품들로 구성되어 있다. 풍력발전기의 제어기는 전체 시스템의 가격 면에서 차지하는 비율이 약 4% 가량이지만, 출력파워를 생산하는 면에서는 매우 중요한 역할을 담당하고 있다. 풍력발전기는 20년의 내구성

§ 이 논문은 대한기계학회 동역학 및 제어부문 2016년도 춘계 학술대회(2016. 4. 27. - 29., 부여롯데리조트) 발표논문임.

† Corresponding Author, cwlim@hanbat.ac.kr

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

을 갖도록 설계되기 때문에 생산되는 출력 파워를 최대화할 수 있도록 제어 방법을 개발하는 것은 매우 중요하다.

풍력발전기는 블레이드의 길이가 길어질수록 로터의 회전 면적이 증가하여 출력 파워가 향상되어 점점 대형화되고 있는 실정이다.⁽¹⁻³⁾ Vestas는 블레이드의 길이가 80m인 7MW 풍력발전기를, Siemens는 블레이드의 길이가 75m인 6MW 풍력발전기를, 미국의 GE는 블레이드의 길이가 73.5인 6MW 풍력발전기를 개발하였다. 그러나 수 MW급의 대형화된 풍력발전기의 경우 로터-블레이드의 회전 지름이 증가함으로 인해 로터-블레이드의 회전 관성 모멘트가 증가하여 출력 파워를 제어하는 발전기의 토크 제어기의 응답속도가 느려지게 된다.^(4,5)

정격 풍속 이하에서의 풍력발전기의 토크 제어는 매우 중요하며, 토크 제어의 주된 목적은 바람이 가진 에너지로부터 최대의 출력 파워를 생산하는 것이다. 토크 제어를 통하여 최대의 출력 파워를 생산하기 위해서는 출력계수가 항상 최대값을 유지하도록 제어되어야 한다. 과거부터 종래까지 많이 사용해 오던 토크 제어 방법 중 최적모드제인을 이용하는 방법이 있다.⁽⁴⁻⁸⁾ 이 토크 제어 방법은 최적모드제인에 발전기 속도를 제공하여 발전기의 토크 입력의 크기를 결정하는 방법으로, 풍력발전시스템이 결정되면 최적모드제인은 한 값으로 고정된다. 이로 인해 이 토크 제어 방법을 소형 풍력발전기의 출력 제어에 적용할 경우 토크 제어기는 빠른 응답 특성을 보이나, 수 MW급 대형 풍력발전기에 적용할 경우 블레이드의 길이 및 로터의 회전 관성 모멘트가 증가되어 토크 제어기의 응답속도는 느려지게 된다. 이런 단점을 극복하기 위하여 최적모드제인을 이용하는 토크 제어 방법을 수 MW급 대형 풍력발전기에 적용할 경우 토크 제어기의 응답을 빠르게 향상하기 위한 토크 제어 방법들이 개발되었다.⁽⁵⁻⁸⁾

본 논문에서는 최적모드제인을 이용하는 기존의 토크 제어 방법을 적용할 때 발전기의 응답속도를 빠르게 하기 위하여 로터속도 비선형 파라미터를 이용하여 추가적인 토크 크기를 결정하는 제어 방법에 대하여 살펴보고자 한다. 공력 토크의 비선형성에 의한 로터속도 비선형 파라미터를 온라인(online) 및 오프라인(offline)으로 계산하여

이를 토크 제어의 게인값으로 이용하는 제어 방법을 살펴본다. 그리고 제안된 토크 제어 방법을 수 MW급 풍력발전기에 적용할 경우 풍력발전기의 발전기 응답속도를 빠르게 하고 출력 파워를 향상시킬 수 있음을 실제 난류 풍속을 고려하여 수치실험적으로 보이고자 한다.

2. 풍력발전기 모델과 난류 풍속

2.1 2MW 풍력발전기

본 논문에서는 정격출력이 2MW인 풍력발전기를 고려하여 수치실험을 수행한다. 수치실험에서 고려된 풍력발전기의 파라미터값들은 Tabel 1과 같다. 바람과 블레이드의 상호 작용에 의한 공력 특성에 의한 출력계수는 Fig. 1과 같이 피치각이 0도에서 최적 주속비(λ_{opt})가 8.1일 때 최대값 ($C_{p,max}$) 0.4662를 가진다. 정상상태에서 최적 주속비가 유지되는 풍속의 범위는 5.3~9.3m/sec이며 이에 대한 발전기의 회전속도 범위는 850~1500rpm이다.

Table 1 Physical parameter values of a 2MW wind turbine

Physical parameters	Values
Rotor radius (R)	40 [m]
Rotor moment of inertia (J_r)	6.03e6 [kgm ²]
Generator moment of inertia (J_g)	60 [kgm ²]
Gear ratio of gearbox (n_{gb})	83.33

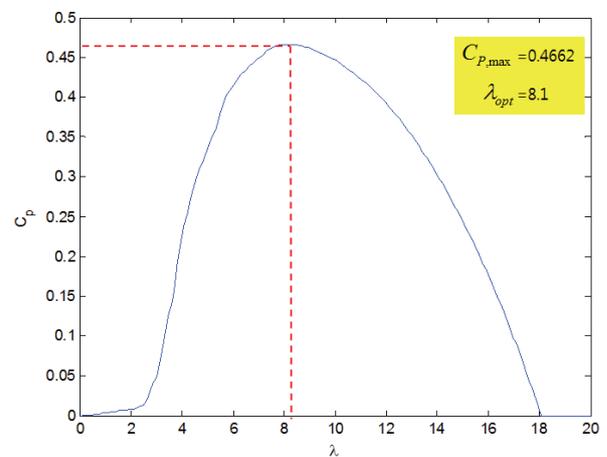


Fig. 1 Power coefficient at pitch angle of 0°

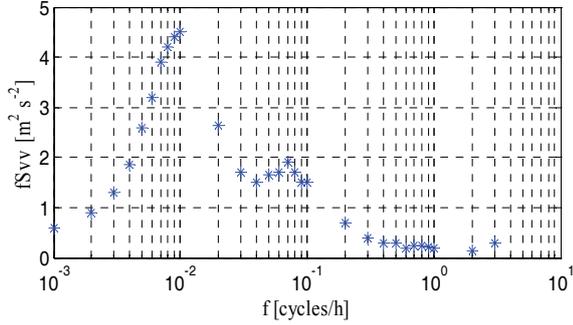


Fig. 2 Spectral model of Van der Hoven

2.2 난류 풍속

풍속의 난류 성분에 의한 풍력발전기의 제어 특성의 변화와 구조물의 진동 영향 등의 해석을 위해서는 실제와 유사한 풍속을 사용하여 풍력발전기 제어시스템의 성능을 평가하는 것은 매우 중요하다. 풍속의 특성은 통계적인 방법을 이용하여 예측할 수 있는데, Van der Hoven에 의한 풍속 특성 스펙트럼이 주로 인용된다.^(4,5) 그러나 Van der Hoven 모델만을 이용해서는 난류 강도의 조절이 되지 않으므로, 10분 이상의 장주기의 풍속은 Van der Hoven 모델을 사용하고 10분 이하의 단주기의 풍속은 Von Karman 모델을 사용하면 난류 강도를 조절할 수 있는 풍속 생성이 가능하다.⁽⁹⁾

Van der Hoven 모델을 바탕으로 10분 이상의 주기를 가지는 장주기의 풍속 특성을 30개의 점을 찍어 표현하면 Fig. 2와 같다. Fig. 2의 주파수 성분을 가지는 풍속을 시간 영역에서 표현하면 식 (1)과 같다.

$$V_w(t) = \sum_{i=1}^{30} A_i \cos(w_i t + \phi_i) \quad (1)$$

여기서 A_i 는 진폭, t 는 시간, w_i 는 주파수이고 ϕ_i 는 위상각이다.

10분 이하의 단주기를 가지는 난류 성분의 풍속은 Von Karman 모델을 이용하여 표현할 수 있는데 Von Karman 모델을 분모의 차수가 2인 식으로 근사화하면 식 (2)와 같다.

$$H_F(s) = \frac{K_v(m_1 T_v s + 1)}{(T_v s + 1)(m_2 T_v s + 1)} \quad (2)$$

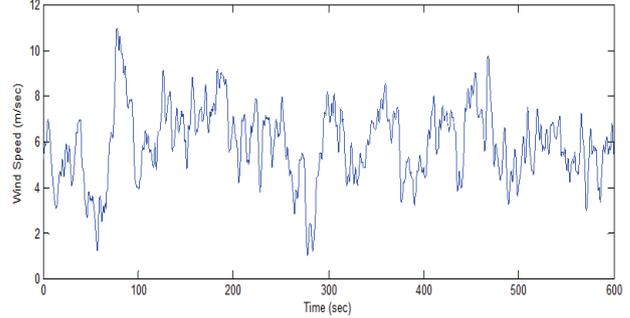


Fig. 3 Turbulence wind speed for simulation

여기서 σ_v 는 풍속의 난류 강도, T_v 는 지형변화계수, $K_v = \sqrt{0.475\sigma_v^2 T_v}$, $m_1 = 0.4$, $m_2 = 0.25$ 이다.

임의의 평균 풍속(V_m)에 대하여 임의의 난류 강도(TI; turbulence intensity)를 가지는 최종적인 바람은 단주기와 장주기의 바람을 합하여 생성된다. IEC 61400-1에서는 풍력발전기가 설치될 장소의 바람 특성을 고려하여 풍력발전기의 클래스(Class)를 정의 및 분류하고 있다.⁽¹⁰⁾ 본 논문의 수치실험에서 사용되는 바람은 IEC 61400-1에서 규정하는 모델 중 일반적인 풍력발전기의 응답을 확인할 수 있는 Class A의 높은 난류 특성을 가지는 평균 풍속을 사용하였다. Matlab/Simulink를 이용하여 구현된 난류 풍속은 Fig. 3과 같은데, 평균 풍속 6 m/sec에 대하여 난류 강도가 26.97%인 경우로 10분 이하의 단주기 고주파 성분이 많이 포함되어 있음을 알 수 있다.

3. 토크 모드 제어 방법

3.1 토크 제어 목적

바람과 로터 블레이드의 상호작용에 의한 공력 출력과 토크는 식 (3)과 식 (4)와 같이 각각 무차원 계수들(C_p , C_Q)을 사용하여 풍속, 주속비, 피치각에 대한 함수로 표현된다.

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

$$T_r(t) = \frac{1}{2} \pi \rho R^3 C_Q(\lambda(t), \beta(t)) V^2(t) \quad (4)$$

여기서 ρ 는 공기 밀도, R 은 블레이드 길이, β 는 블레이드 피치각, V 는 풍속, C_p 는 출력 계수,

C_Q 는 토크계수, λ 는 주속비로 식 (5)와 같이 정의된다.

$$\lambda(t) = \frac{\Omega_r(t)R}{V(t)} \quad (5)$$

여기서 Ω_r 은 로터 속도이다.

정격풍속 이하에서의 풍력발전기의 제어는 토크 제어에 의해 수행되며 이 경우 토크 제어의 목적은 최대의 출력 파워를 생산하도록 하는 것이다. 이를 위해서 풍력발전기의 회전 속도를 풍속에 대하여 일정한 값을 가지도록 해야 한다. 즉, 주속비(λ)를 항상 최적값(λ_{opt})으로 유지하도록 해야 한다. 주속비의 최적값(λ_{opt})은 출력계수(C_p)가 최대값($C_{p,max}$)이 될 때의 주속비 값이다.

기어박스가 포함된 풍력발전기를 고려하면 로터 속도는 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\Omega_r(t) = \Omega_g(t)/n_{gb} \quad (6)$$

여기서 Ω_g 는 발전기 속도이고 n_{gb} 는 기어박스의 증속비이다.

3.2 최적모드게인을 이용한 토크 제어기

식 (3)의 공력 출력의 최대 출력파워(P_{max})를 구하면 식 (7)과 같다.

$$P_{max}(t) = K_{opt}\Omega_g^3(t) \quad (7)$$

여기서 K_{opt} 는 최적모드게인으로써 식 (8)과 같다.

$$K_{opt} = \frac{1}{2\lambda_{opt}^3 n_{gb}^3} \pi \rho R^5 C_{p,max} \quad (8)$$

식 (7)의 양변을 Ω_g 로 나누면 발전기 토크는 식 (9)와 같이 표현된다.

$$T_g(t) = K_{opt}\Omega_g^2(t) \quad (9)$$

식 (9)를 이용하여 발전기의 토크 크기를 제어한다는 의미는 풍력발전기의 동작점에서의 정상상태의 특성을 이용하겠다는 뜻이다. 그러므로 10분 이하의 단주기 성분이 포함된 난류 풍속에 대

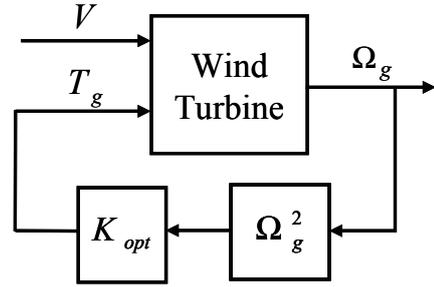


Fig. 4 A torque control method using the optimal mode gain

하여 과도 특성에서 제어 성능이 좋지 않으며, 또한 수 MW급의 대형 풍력발전기의 경우에는 큰 질량 관성 모멘트를 가지는 블레이드로 인해 정상상태로 수렴하는 속도가 늦어지는 단점을 가진다.

4. 응답 향상을 위한 토크 제어 방법

4.1 로터 속도 비선형 파라미터

로터 속도(Ω_{ro}), 피치각(β_o), 풍속(V_o)에 대한 동작점(O_p) 근처에서의 로터 속도, 피치각, 풍속의 변화를 각각 $\delta\Omega_r$, $\delta\beta$, δV 로 두면 식 (4)의 비선형적인 공력 토크는 식 (10)과 같이 선형화가 가능하다.

$$T_r(t) = T_{ro}(t) + \delta T_r(t) \quad (10)$$

여기서 $T_{ro} = T_r|_{O_p}$ 로 동작점에서의 공력 토크이고, δT_r 은 동작점 근처에서의 공력 토크의 변화로 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned} \delta T_r(t) = & \left. \frac{\partial T_r(t)}{\partial \Omega_r(t)} \right|_{O_p} \cdot \delta \Omega_r(t) \\ & + \left. \frac{\partial T_r(t)}{\partial \beta(t)} \right|_{O_p} \cdot \delta \beta(t) + \left. \frac{\partial T_r(t)}{\partial V(t)} \right|_{O_p} \cdot \delta V(t) \end{aligned} \quad (11)$$

최적 주속비 구간에서의 피치각의 동작점은 한 값으로 고정되어 있으므로 피치각에 대한 공기역학적 토크의 변화는 없다. 최적 주속비 구간에서의 토크 제어의 특성을 파악하기 위해서는 로터 속도의 변화에 대해 알아야 하므로, 이를 식 (12)와 같이 둔다. 공력 토크를 로터 속도에 대하

여 편미분한 값은 물리적으로 감쇠 역할을 하므로, (-) 부호를 이용하여 표현한다.

$$N_{\Omega_r}(t) = - \frac{\partial T_r(t)}{\partial \Omega_r(t)} \quad (12)$$

로터 속도에 대한 공력 토크의 변화를 나타내는 N_{Ω_r} 은 출력 계수를 이용하여 구할 수 있다. 출력 계수를 로터 속도에 대하여 편미분하고, 식 (4)의 공력 토크를 출력계수의 항으로 표현하고 로터 속도에 대하여 편미분하면 식 (13)과 같이 로터 속도 비선형 파라미터를 구할 수 있다.

$$N_{\Omega_r}(t) = \frac{\pi R^2}{2} \left[\frac{V^3(t)}{\Omega_r^2(t)} C_p(t) - \frac{R V^2(t)}{\Omega_r(t)} \frac{\partial C_p(t)}{\partial \lambda(t)} \right] \quad (13)$$

기어박스가 포함된 풍력발전기의 경우 로터측에서의 로터 속도 비선형 파라미터(N_{Ω_r})는 발전기 측에서는 발전기 속도 비선형 파라미터(B_{Ω_g})가 되며 식 (14)와 같이 로터 속도 비선형 파라미터를 기어비의 제곱으로 나눈 값이다.

$$B_{\Omega_g}(t) = N_{\Omega_r}(t) / n_{gb}^2 \quad (14)$$

4.2 로터 속도 비선형 파라미터를 이용한 토크 제어기

본 논문에서는 최적모드제인을 이용한 토크 제어의 응답 속도를 빠르게 하기 위해 공력 토크의 로터 속도 비선형 파라미터를 이용하는 식 (15)와 같은 토크 제어 방법을 살펴본다. 고려된 토크 제어 방법은 기존의 최적모드제인을 이용한 발전기 토크 크기에 추가적인 토크 크기를 더하는 형태로 Fig. 5와 같다. 발전기 속도 기준입력(Ω_{ref})과 발전기 회전속도(Ω_g)와의 오차를 구하고 이

오차를 줄이기 위하여 제어제인을 사용하는 방법이다. 제어 제인은 발전기 속도 비선형 파라미터 (B_{Ω_g})와 게인상수(α_g)를 곱하여 사용한다. 게인상수 α_g 는 제어기에 의한 성능 조절을 위하여 사용되는 것으로 양의 값을 가지며, 큰 게인상수의 사용은 발전기의 응답을 더 가속화할 수 있다.

$$T_g(t) = K_{opt} \Omega_g^2(t) + \alpha_g B_{\Omega_g} (\Omega_g(t) - \Omega_{ref}(t)) \quad (15)$$

최적모드제인을 이용한 토크 제어기를 사용할 경우 출력 응답은 1차 시스템의 특성을 가진다. 발전기 속도 비선형 파라미터 B_{Ω_g} 는 물리적으로 감쇠 역할을 하기 때문에, 실제 풍력발전기는 안정한 시스템이므로 양수의 값을 가진다. 게인상수 α_g 가 양수인 경우에는 추가적인 토크 크기의 조절을 통하여 감쇠를 증가시켜 응답을 더 빠르게 하는 역할을 한다. 그러나 게인상수 α_g 가 음수인 경우에는 추가적인 토크 크기의 조절은 음의 감쇠를 만들어 시스템을 불안정하게 할 수 있다. 그러므로 토크 제어가 안정하기 위해서는 게인상수 α_g 가 양수가 되어야 한다.

식 (13)의 로터 속도 비선형 파라미터 N_{Ω_r} 의 정의에 따르면 풍속, 로터 회전속도, 출력계수, 주속비에 대한 출력계수의 미분치 정보를 이용하여 실시간적으로 계산되어야 한다. 풍속과 로터 회전속도는 일반적인 토크 제어 시에 측정 및 추정할 수 있는 값이지만, 출력계수와 주속비에 대한 출력계수의 미분치는 일반적으로 주어지거나 측정 및 추정되는 값이 아니다. 그러므로 본 연구에서는 출력계수와 주속비에 대한 출력계수의 미분치 정보를 실시간적으로 계산하여 발전기 속도 비선형 파라미터 B_{Ω_g} 를 계산하는 “온라인(online) 경우”와, 이들의 값을 실시간적으로 계산하지 않고 발전기 속도 비선형 파라미터 B_{Ω_g} 의 정상상태값을 이용하는 “오프라인(offline) 경우”에 대하여 각각 살펴보았다. “온라인(online) 경우”에는 풍속과 로터 회전속도뿐만 아니라 출력계수와 주속비에 대한 출력계수의 미분치 정보를 실시간적으로 계산하여 발전기 속도 비선형 파라미터 B_{Ω_g} 를 계산하도록 Matlab/ Simulink 모델을 구현하였다. “오프라인(offline) 경우”에는 각 풍속에 대하여 정상상태값을 Fig. 6과 같이 구하여 이

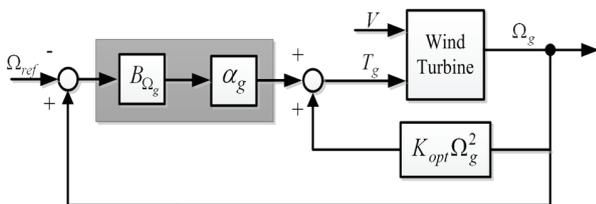


Fig. 5 A modified torque control method using the nonlinear parameter of rotor speed

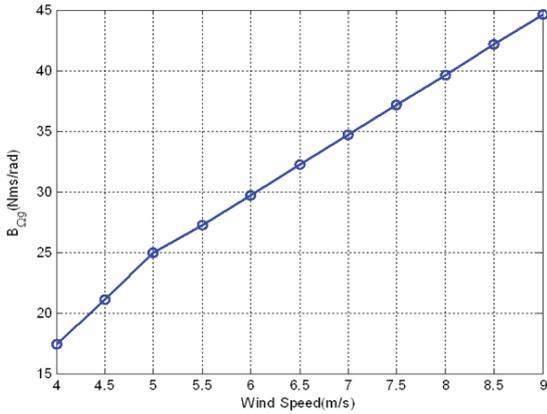


Fig. 6 Steady-state values of nonlinear parameter of generator speed

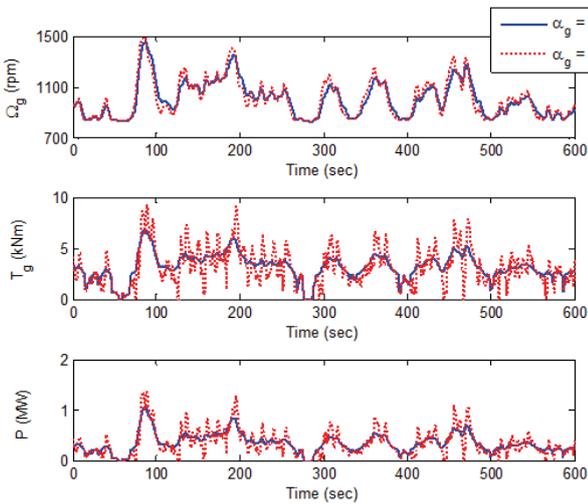


Fig. 7 Comparison of responses: online case

의 정보를 순람표(look-up table)를 이용하여 구현하였다.

5. 난류 풍속에 대한 수치실험

실제와 유사한 풍속을 사용하여 풍력발전기의 토크 제어기의 성능(발전기 회전속도, 발전기 토크, 출력 파워 등)을 평가하는 것은 매우 중요하다. 2.1절에서 언급한 2MW 풍력발전기를 대상으로 난류 풍속에 대하여 수치실험을 수행하였다. 풍속의 특성은 통계적인 방법을 이용하여 예측할 수 있는데, 수치실험에 사용한 난류 풍속은 IEC 61400-1에서 규정하고 있는 Class A급 풍력발전기 적용하는 것으로, Fig. 3과 같이 10분 간의 평균 풍속은 6m/s이고 난류강도는 26.97%이다.

Fig. 7은 최적모드게인 만을 사용한 경우(게인

Table 2 Simulation results for online case

Generated power		Mean	Rms	Standard deviation
$\alpha_g=0$	Value (MW)	0.3482	0.3935	0.1832
	Increasing rate (%)	-	-	-
$\alpha_g=1$	Value (MW)	0.3493	0.4009	0.1968
	Increasing rate (%)	0.32	1.88	7.42
$\alpha_g=2$	Value (MW)	0.3502	0.4104	0.2140
	Increasing rate (%)	0.57	4.29	16.81
$\alpha_g=3$	Value (MW)	0.3510	0.4215	0.2334
	Increasing rate (%)	0.80	7.12	27.40
$\alpha_g=4$	Value (MW)	0.3517	0.4335	0.2535
	Increasing rate (%)	1.00	10.16	38.37

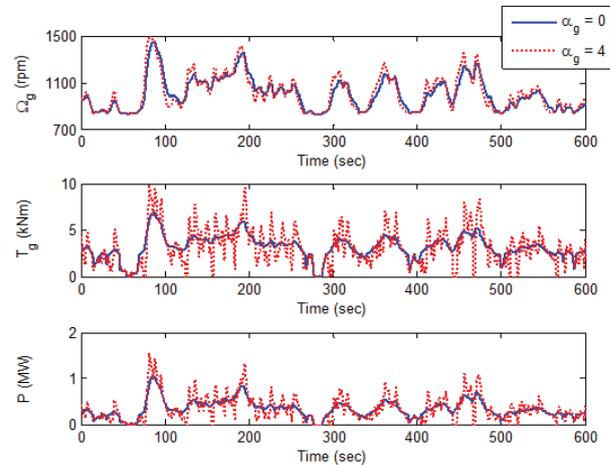


Fig. 8 Comparison of responses: offline case

상수 $\alpha_g=0$ 인 경우)와 발전기 속도 비선형 파라미터와 게인상수 $\alpha_g=4$ 를 적용한 “온라인(online) 경우”의 발전기 속도, 발전기 토크와 출력 파워를 비교하여 보여주고 있다. 발전기 속도 비선형 파라미터와 게인상수를 이용하여 추가적인 토크 크기를 빠르게 조절해 줌으로 발전기의 응답속도를 빠르게 하고 이에 대한 결과로 출력 파워를 향상할 수 있음을 확인할 수 있다. Table 2는 “온라인(online) 경우”의 게인상수의 변화에 따른 출력 파워의 평균값, 실효값과 표준편차를 보여주고 있

Table 3 Simulation results for offline case

Generated power		Mean	Rms	Standard deviation
$\alpha_g=0$	Value (MW)	0.3482	0.3935	0.1832
	Increasing rate (%)	-	-	-
$\alpha_g=1$	Value (MW)	0.3501	0.4056	0.2049
	Increasing rate (%)	0.55	3.07	11.84
$\alpha_g=2$	Value (MW)	0.3513	0.4192	0.2287
	Increasing rate (%)	0.89	6.53	24.84
$\alpha_g=3$	Value (MW)	0.3521	0.4324	0.2511
	Increasing rate (%)	1.12	9.89	37.06
$\alpha_g=4$	Value (MW)	0.3526	0.4447	0.2709
	Increasing rate (%)	1.26	13.01	47.87

다. 계인상수를 크게 할수록 발전기 토크 크기를 더 빠르게 조절하도록 하여 발전기 속도의 응답을 더 빠르게 조절할 수 있으며, 계인상수 $\alpha_g=4$ 를 적용한 경우 출력 파워의 평균값은 1% 정도로 실효값은 약 10% 정도 향상됨을 확인할 수 있다.

그리고 Fig. 8은 최적모드계인 만을 사용한 경우(계인상수 $\alpha_g=0$ 인 경우)와 발전기 속도 비선형 파라미터와 계인상수 $\alpha_g=4$ 를 적용한 “오프라인(offline) 경우”의 발전기 속도, 발전기 토크와 출력 파워를 비교하여 보여주고 있다. “온라인(online) 경우”와 동일하게 발전기 속도 비선형 파라미터와 계인상수를 이용하여 추가적인 토크 크기를 빠르게 조절해 줌으로 발전기의 응답속도를 빠르게 하고 이에 대한 결과로 출력 파워를 향상할 수 있음을 확인할 수 있다. Table 3은 “오프라인(offline) 경우”의 계인상수의 변화에 따른 출력 파워의 평균값, 실효값과 표준편차를 보여주고 있다. 계인상수를 크게 할수록 발전기 토크 크기를 더 빠르게 조절하도록 하여 발전기 속도의 응답을 더 빠르게 조절할 수 있으며, 계인상수 $\alpha_g=4$ 를 적용한 경우 출력 파워의 평균값은 1.26% 정도로 실효값은 약 13% 정도 향상됨을 확인할 수 있다.

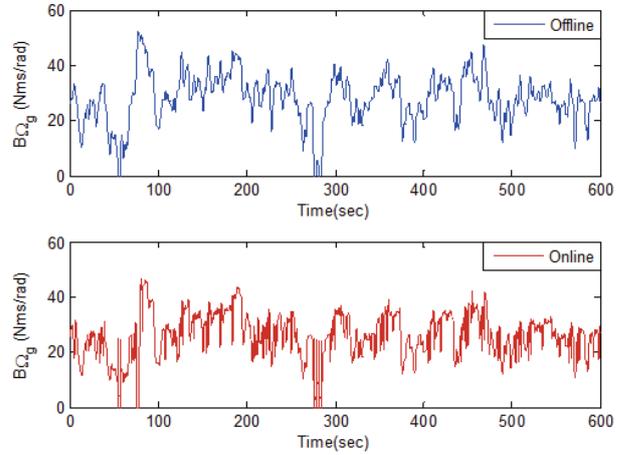


Fig. 9 Comparison of variations of nonlinear parameter of generator speed: $\alpha_g=4$

실제 난류 풍속에 적용한 결과 “오프라인(offline) 경우”가 “온라인(online) 경우”보다 출력 파워를 조금 더 향상시킴을 확인할 수 있었다. Fig. 9는 계인상수 $\alpha_g=4$ 인 경우에 대하여 “오프라인(offline) 경우”와 “온라인(online) 경우”의 발전기 속도 비선형 파라미터 B_{Ω_g} 의 변화를 보여 준다. “온라인(online) 경우” B_{Ω_g} 의 변화가 좀 더 급격하게 변하는데, 특히 풍속이 급격하게 변하는 50~100초 구간과 250~300초 구간에서 이의 변화가 더 큼을 알 수 있다. 이는 풍속이 급격하게 변함으로 인해 주속비에 대한 출력계수의 미분치가 급격하게 변하기 때문이다.

계인상수를 올리면 출력 파워의 평균값이 더 향상되었지만 증가되는 정도는 줄어들었다. “오프라인(offline) 경우” 계인상수 $\alpha_g=5, 10, 20, 30, 40$ 을 적용한 경우 출력 파워의 평균값은 각각 1.38%, 1.67%, 1.87%, 1.95%, 2.01% 정도 향상됨을 확인할 수 있었다. 출력 파워의 평균값을 2% 이상 향상하려면 계인상수 α_g 를 40까지 높여야 하였다. 출력 파워의 평균값에서 토크 제어를 통한 1% 정도의 향상은 실제 큰 효과가 있는 것이므로, 계인상수 α_g 를 4 정도까지 사용하는 것이 실제적이라 보인다.

6. 결 론

본 논문에서는 최적모드계인을 이용하는 기존의 토크 제어 방법을 바탕으로 실제 난류 풍속에 대하여 풍력발전기의 응답속도 향상을 위한 토크

제어 방법을 살펴보았다. 이의 방법은 공력 토크의 로터 속도 비선형 파라미터(기어박스가 있는 경우는 발전기 속도 비선형 파라미터)와 계인상수를 제어 계인을 이용하여 기존의 최적모드계인을 이용한 발전기 토크 크기에 추가적인 토크 크기를 더하는 형태였다. 로터 속도 비선형 파라미터를 계산 시에 정의에 따라 출력계수와 주속비에 대한 출력계수의 미분치 정보를 실시간적으로 계산하는 “온라인(online) 경우”와, 이들의 값을 실시간적으로 계산하지 않고 정상상태값을 이용하는 “오프라인(offline) 경우”에 대하여 각각 살펴보았다.

2MW급 풍력발전기를 대상으로 IEC 61400-1에서 규정하고 있는 Class A급 풍력발전기 적용하는 난류 풍속에 대하여 토크 제어기의 응답을 확인하였다. “온라인(online) 경우”와 “오프라인(offline) 경우” 모두 계인상수를 크게 할수록 발전기 토크 크기를 더 빠르게 조절하도록 하여 발전기 속도의 응답을 더 빠르게 조절할 수 있으며, 이에 대한 결과로 출력 파워를 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 계인상수 4를 사용한 경우 출력 파워의 평균값이 최적모드계인만을 사용한 기존의 토크 제어 방법보다 1% 이상 증가함을 확인하였다. 실제 풍력발전기에서 출력 파워의 평균값이 1% 증가한 것은 매우 큰 것이다. 그리고 “오프라인(offline) 경우”가 “온라인(online) 경우”보다 출력 파워를 좀 더 향상시키고 실용적임을 확인하였다.

향후 “오프라인(offline) 경우”에 대하여 풍속을 추종하여 풍속의 직접적인 정보없이도 실제 적용이 가능한 방법에 대한 추가적인 연구수행을 진행할 예정이다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2015R1D1A3A01019361)을 받아 수행된 연구입니다.

참고문헌 (References)

- (1) Yaramasu, V., Wu, B., Sen, P. C., Kouro, S. and Narimani, M., 2015, "High-Power Wind Energy Conversion Systems: State-of-the-Art and Emerging Technologies," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 103, No. 5, pp. 740~788.
- (2) Kaldellis, J. K. and Zafirakis, D., 2011, "The Wind Energy (R)Evolution: A Short Review of a Long History," *Renewable Energy*, Vol. 36, No. 7, pp. 1887~1901.
- (3) Maria, I. B., 2009, "The Economics of Wind Energy," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, pp. 1372~1382.
- (4) Bianchi, F. D., Battista, H. D. and Mantz, R. J., 2007, *Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling and Gain Scheduling Design*, Springer-Verlag.
- (5) Munteanu, I., Bratcu, A. L., Cutululis, N. A. and Ceanga, E., 2008, *Optimal Control of Wind Energy Systems*, Springer-Verlag.
- (6) Buehring, K. and Freris, L. L., 1981, "Control Policies for Wind Energy Conversion Systems," *IEE Proceedings, Part C*, Vol. 128, No. 5, pp. 253~261.
- (7) Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D. and Bossanyi, E., 2011, *Wind Energy Handbook*, Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd.
- (8) Lim, C. W. and Seo, K. Y., 2010, "Comparison of Response Properties Determined in Two Control Methods for a 2.75MW Wind Turbine Under Turbulence Wind Speed," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 34 No. 12 pp. 1885~1891.
- (9) Nichita, C., Luca, D., Dakyo, B. and Ceanga, E., 2002, "Large Band Simulation of the Wind Speed for Real Time Wind Turbine Simulators," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 17, pp. 523~529.
- (10) IEC-61400-1 3rd Ed., 2005, *Wind Turbine Part I: Design Requirements, Normal Turbulence Model*.