

최적 주속비 구간에서 로터속도 비선형 파라미터를 이용한 풍력터빈의 토크제어

임채욱*·김상균**

Torque Control of Wind Turbine Using Nonlinear Parameter of Rotor Speed in the Region of Optimal Tip Speed Ratio

Chae-Wook Lim*, Sang-Gyun Kim**

Key Words : Wind Turbine(풍력터빈), Aerodynamic Torque(공기역학적 토크), Rotor Speed(로터속도), Nonlinear Parameter(비선형 파라미터), Torque Control(토크제어)

ABSTRACT

Aerodynamic torque of wind turbine has nonlinear properties. Nonlinearity of aerodynamic torque is very important in wind turbine in the aspect of control. The traditional torque control method using optimal mode gain has been applied in many wind turbines but its response is slower as wind turbine size is larger. In this paper, a torque control method using a nonlinear parameter of rotor speed among nonlinear properties of aerodynamic torque. Simulink model is implemented to obtain the nonlinear parameter of rotor speed and numerical simulations for a 2MW wind turbine are carried out and simulation results for the traditional and proposed torque control methods are compared.

1. 서론

풍력터빈은 바람이 가진 운동에너지를 블레이드 회전을 통하여 기계적인 에너지로 변환시키고 발전기를 이용하여 전기에너지로 변환하는 기계이다^(1,2). 풍력터빈의 제어에 있어서 중요하게 고려되어야 할 사항 중의 하나는 바람과 블레이드의 상호작용에 의한 공기역학적 토크의 비선형의 영향이다. 공기역학적 토크의 비선형성으로 인해 블레이드, 로터, 회전축, 기어박스, 타워, 발전기 등 풍력터빈의 각 구성요소들을 선형모델로 가정하더라도 풍력터빈의 전체 거동은 비선형적인 거동을 보이게 된다^(3~7). 풍력터빈의 비선형성과 제어는 밀접한 연관성을 갖는다. 풍력터빈 제어에 있어서 비선형적인 3가지의 요인이 존재하게 된다. 입력이 되는 풍속, 토크제어에 영향을 주는 로터속도, 피치제어에 영향을 주는 피치각이 존재하게 된다. 토크제어는 발전기 회전속도를 제어하기 위해서 발전기 토크입력을 조절하여 최적의 발전기

속도를 제어하게 된다. 종래에 많이 사용해오던 토크제어 방법으로 최적모드게인을 이용하는 방법이 있다⁽¹⁾. 이 제어방법은 최적모드게인에 발전기 회전속도를 제공하여 토크입력을 결정하는 방법으로, 최적모드게인이 한 값으로 고정되므로 발전기 회전속도의 응답속도를 빠르게 향상시킬 수 없는 단점이 있다. 실제 풍력터빈이 대형화되는 추세로 인해 블레이드 길이 및 로터 관성모멘트가 증가하게 되어 토크시스템의 응답속도가 느려지게 되는데, 이 제어방법으로는 발전기 응답속도를 빠르게 향상시킬 수 없다. 이런 단점을 극복하기 위해 공기역학적 토크를 이용하는 방법, PI 제어를 이용하는 방법 등 여러 방법들이 연구되고 있다^(1,3,4,8).

본 논문에서는 최적모드게인을 이용하는 기존의 토크제어 방법을 적용할 때 발전기 응답속도를 빠르게 하기 위하여 로터속도 비선형 파라미터를 이용하여 추가적인 토크입력을 결정하는 제어방법에 대하여 살펴보고자 한다. 공기역학적 비선형성에 의한 로터속도 비선형 파라미터를 실시간으로 계산하고 이를 토크제어의 게인값으로 이용하는 제어방법을 제안한다. 그리고 제안된 토크제어 방법을 수 MW급 풍력터빈에 적용할 경우 풍력터빈의 발전기 응답속도를 빠르게 하

* 한밭대학교 기계공학과

** 한밭대학교 기계공학과 대학원

† 교신저자, E-mail : cwlim@hanbat.ac.kr

고 출력파워를 향상시킬 수 있음을 수치실험적으로 보이고자 한다.

2. 전통적인 토크제어 방법

2.1 토크제어의 목적

바람과 로터 블레이드의 상호작용에 의한 공기역학적 출력과 토크는 식 (1), (2)와 같이 각각 무차원 계수들(C_p, C_Q)을 사용하여 풍속, 주속비, 피치각에 대한 함수로 표현된다.

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

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

여기서 ρ 는 공기밀도, R 은 로터의 반경, 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.

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

여기서 Ω_r 은 로터 회전속도이다. 그리고 출력계수와 토크계수는 주속비를 이용하여 식 (4)와 같은 관계가 있다.

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

정격풍속 이하 최적 주속비 구간에서의 토크제어의 목적은 최대의 출력파워를 생산하도록 하는 것이다. 이를 위해서는 주속비를 항상 최적값으로 유지하도록 해야 한다. 주속비의 최적값(λ_{opt})은 출력계수가 최대값($C_{p,max}$)이 될 때의 주속비 값이다. 여기에서 사용되는 출력계수는 Fig. 1과 같다. 출력계수는 주속비와 출력계수의 함수이고 최대값($C_{p,max}$)을

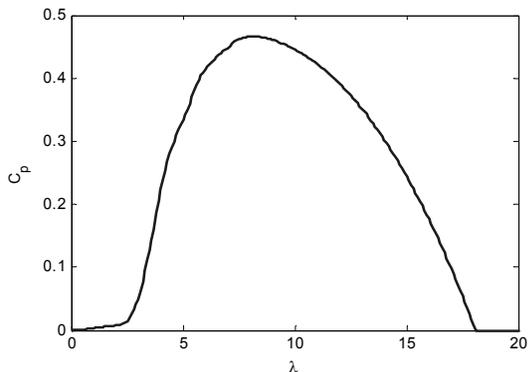


Fig. 1 Power coefficient at pitch angle of 0°

가지는 한 점이 존재함을 알 수 있는데, 주속비가 8.1일 때 최대 출력계수는 0.4662이다. 정격풍속 이하에서의 블레이드 피치각은 하나의 값으로 고정되므로 여기에서는 피치각이 0° 인 경우를 고려하였다.

2.2 최적모드제어를 이용한 토크제어

기어박스가 포함된 풍력터빈을 고려하면 로터 회전속도는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\Omega_r(t) = \Omega_g(t)/N_{gb} \quad (5)$$

여기서 Ω_g 는 발전기 회전속도이고 N_{gb} 는 기어박스 증속비이다.

최적 주속비 구간에서의 발전기 토크 T_g 는 식 (6)과 같이 표현된다.

$$T_g(t) = K_{opt} \Omega_g^2(t) \quad (6)$$

여기서 K_{opt} 는 최적모드제어로 기어박스가 있는 경우에는 식 (7)과 같다.

$$K_{opt} = \frac{1}{2\lambda_{opt}^3 N_{gb}^3} \pi \rho R^5 C_{p,max} \quad (7)$$

최적모드제어를 이용한 토크제어는 풍속의 입력에 따라 최적 주속비를 얻기 위하여 토크-속도 정상상태 관계특성을 나타내는 식 (6)을 이용하여 발전기 토크입력(T_g)을 발전기 회전속도(Ω_g)의 제곱에 비례하도록 제어하는 것이다.

풍력터빈 1-질량 모델을 발전기측에서의 운동방정식으로 표현하면 식 (8)의 1차 미분방정식과 같다.

$$J_e \dot{\Omega}_g(t) + B_e \Omega_g(t) = T_e(t) - T_g(t) \quad (8)$$

여기서 J_e 는 등가 회전관성모멘트이고 B_e 는 등가 감쇠이고 T_e 는 발전기측에서의 등가 공기역학적 토크로 식 (9)와 같이 공기역학적 토크를 기어비로 나눈 값이다.

$$T_e(t) = T_r(t)/N_{gb} \quad (9)$$

최적모드제어 방법에 의한 발전기 토크입력과 발전기 회전속도 사이의 개루프 전달함수는 식 (10)과 같이 표현된다.

$$\frac{\Omega_g(s)}{T_g(s)} = \frac{-1}{J_e s + B_e} \quad (10)$$

식 (10)의 분모를 보면 J_e 값은 제어 관점에서 시스템의 시상수와 관련이 있다. 따라서 식 (6)을 이용하여 발전기 토크를 제어할 때 풍력터빈이 대형화되면 큰 회전관성모멘트를 가지는 블레이드로 인해 발전기의 응답속도가 늦어지는 단점을 가짐을 알 수 있다.

3. 제안된 토크제어 방법

3.1 로터속도의 비선형 파라미터

로터속도(Ω_r), 피치각(β), 풍속(V)에 대한 동작점(O_p)을 식 (11)과 같이 두고, 동작점 근처에서의 로터속도, 피치각, 풍속의 변화를 각각 $\delta\Omega_r$, $\delta\beta$, δV 로 두면 식 (2)의 비선형적인 공기역학적 토크는 식 (12)와 같이 선형화 가능하다.

$$O_p = \{\Omega_{ro}, \beta_o, V_o\} \quad (11)$$

$$T_r(t) = T_{ro}(t) + \delta T_r(t) \quad (12)$$

여기서 $T_{ro} = T_r|_{O_p}$ 로 동작점에서의 공기역학적 토크이고, δT_r 은 동작점 근처에서의 공기역학적 토크의 변화로 식 (13)과 같다.

$$\delta T_r(t) = \left. \frac{\partial T_r(t)}{\partial \Omega_r(t)} \right|_{O_p} \cdot \delta \Omega_r(t) + \left. \frac{\partial T_r(t)}{\partial \beta(t)} \right|_{O_p} \cdot \delta \beta(t) + \left. \frac{\partial T_r(t)}{\partial V(t)} \right|_{O_p} \cdot \delta V(t) \quad (13)$$

최적 주속비 구간에서의 피치각의 동작점은 한 값으로 고정되어 있으므로 피치각에 대한 공기역학적 토크의 변화는 없다. 최적 주속비 구간에서의 토크제어의 특성을 파악하기 위해서는 로터속도의 변화에 대하여 알아야 하므로, 이를 식 (14)와 같이 둔다. 공기역학적 토크를 로터속도에 대하여 편미분한 값은 물리적으로 감쇠 역할을 하므로, (-) 부호를 이용하여 표현한다.

$$N_{\Omega_r}(t) = - \left. \frac{\partial T_r(t)}{\partial \Omega_r(t)} \right|_{O_p} \quad (14)$$

로터속도에 대한 공기역학적 토크의 변화를 나타내는 N_{Ω_r} 은 출력계수를 이용하여 구할 수 있다. 출력계수를 로터속도에 대하여 편미분하면 식 (15)와 같이 표현된다. 식 (2)의 공기역학적 토크를 식 (3)을 이용하여 출력계수의 항으로 표현하고 로터속도에 대하여 편미분한 후 식 (15)를 이용하면 식 (16)과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial C_p(t)}{\partial \Omega_r(t)} = \frac{R}{V(t)} \frac{\partial C_p(t)}{\partial \lambda(t)} \quad (15)$$

$$\frac{\partial T_r(t)}{\partial \Omega_r(t)} = \frac{\pi R^2}{2} \left[- \frac{V^3(t)}{\Omega_r^2(t)} C_p(t) + \frac{R V^2(t)}{\Omega_r(t)} \frac{\partial C_p(t)}{\partial \lambda(t)} \right] \quad (16)$$

식 (16)을 이용하여 식 (14)의 로터속도 비선형 파라미터(N_{Ω_r})를 구할 수 있다.

기어박스가 포함된 풍력터빈의 경우 로터측에서의 식 (14)의 로터속도 비선형 파라미터(N_{Ω_r})는 발전기측에서는 발전기 속도 비선형 파라미터(B_{Ω_g})가 되며 식 (17)과 같이 로터속도 비선형 파라미터를 기어비의 제곱으로 나눈 값이다.

$$B_{\Omega_g}(t) = N_{\Omega_r}(t) / N_{gb}^2 \quad (17)$$

3.2 토크제어 방법 제안

본 논문에서는 최적모드제인을 이용한 토크제어의 응답속도를 빠르게 하기 위해 공기역학적 토크의 로터속도 비선형 파라미터를 이용하는 식 (18)과 같은 토크제어 방법을 제안한다. 제안된 토크제어 방법은 기존의 최적모드제인을 이용한 발전기 토크입력에 추가적인 입력을 더하는 형태로 Fig. 2와 같다. 발전기속도 기준입력(Ω_{ref})과 발전기 회전속도(Ω_g)와의 오차를 구하고 이 오차를 줄이기 위하여 제어제인을 사용하는 방법이다. 제어제인은 발전기속도 비선형 파라미터(B_{Ω_g})와 계인상수(α_g)를 곱하여 사용한다. 발전기속도 비선형 파라미터 B_{Ω_g} 는 풍속과 발전기 회전속도 정보를 이용하여 실시간적으로 계산되며, 계인상수 α_g 는 발전기의 응답을 더 가속화하기 위해 사용되는 것으로 양의 값을 가진다.

$$T_g(t) = K_{opt} \Omega_g^2(t) + \alpha_g B_{\Omega_g} (\Omega_g(t) - \Omega_{ref}(t)) \quad (18)$$

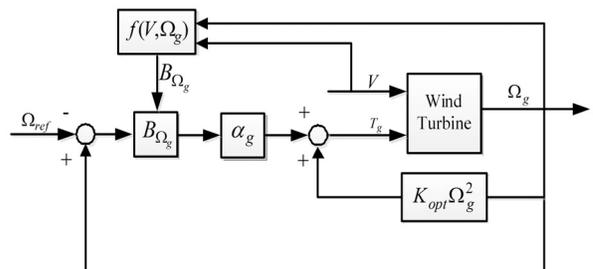


Fig. 2 A proposed torque control method using nonlinear parameter of rotor speed

4. 수치실험

4.1 2 MW 풍력터빈

본 논문에서는 정격출력이 2 MW인 풍력터빈의 모델을 고려하였다. 풍력터빈의 최대출력은 Fig. 1과 같이 최적주속비 (λ_{opt})가 8.1일 때 출력계수 최대값($C_{P,max}$)은 0.4662를 갖는다. 최적 주속비 구간의 풍속 범위는 5.27~9.31 m/s이다.

4.2 Simulink 구현

공기역학적 토크를 로터속도에 따라 선형화한 비선형 파라미터 값(N_{Ω_r})을 실시간적으로 계산하기 위해 Fig. 3과 같이 Simulink 모델을 구현하였다. Simulink 모델에서 출력계수 (C_p)를 주속비(λ)로 나눈 편미분치는 룩업(look-up) 표를 이용하여 구현하였다. 발전기 속도 비선형 파라미터(B_{Ω_g})는 로터속도 비선형 파라미터(N_{Ω_r})를 기어비의 제곱으로 나누면 구할 수 있는데, 최적 주속비 구간에서 B_{Ω_g} 의 정상상태 값을 구하면 Fig. 4와 같다. B_{Ω_g} 는 최적 주속비 구간에서 풍속이 커짐에 따라 커지는 경향을 보임을 알 수 있다. 고려된 풍력터빈의 경우 B_{Ω_g} 는 최적 주속비 구간에서 풍속에 따라 거의

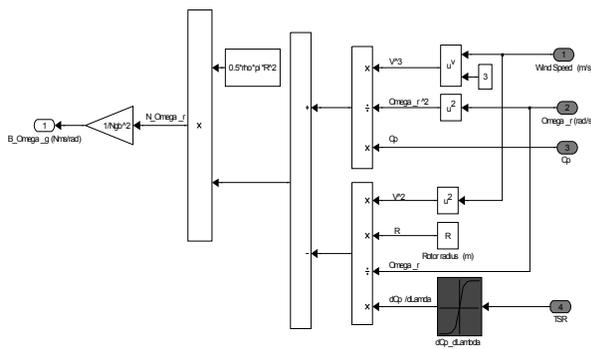


Fig. 3 A Simulink model for calculating nonlinear parameter of rotor speed in real time

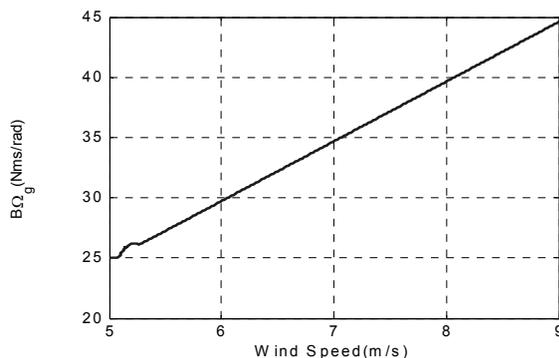


Fig. 4 Steady-state values of nonlinear parameter of generator speed with respect to wind speed

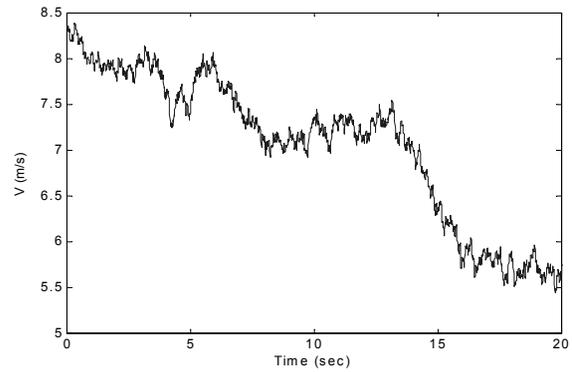


Fig. 5 Simulated turbulence wind speed

선형적으로 커지는 경향을 보였고, 풍속 9 m/s에서의 값은 풍속 5 m/s에서의 값보다 약 1.8배 정도 큰 값을 가졌다.

4.3 수치실험 방법

수치실험을 위한 풍속입력은 계단풍속과 난류풍속을 고려하였다. 계단풍속은 20초에서 8 m/s에서 6 m/s로 변하는 풍속을 이용하였다. 난류풍속은 10분 동안의 평균풍속이 7 m/s 이고 난류강도가 10%인 풍속을 고려하였다. Fig. 5는 고려된 난류풍속 중 풍속이 급격하게 변하는 0초에서 20초 구간의 풍속변화를 보여준다. 본 논문에서 제안된 토크제어 방법을 적용한 수치실험 결과를 최적모드제어를 이용하는 전통적인 토크제어방법의 응답과 비교한다.

4.4 수치실험 결과

계단풍속에 대한 발전기 회전속도, 발전기 토크, 출력파워, 출력계수, 발전기 비선형 파라미터의 정상상태까지 수렴하는 응답특성이 향상됨 확인할 수 있다. 제안된 토크제어 방법에서 계인상수(α_g) 1을 사용한 결과는 Fig. 6에서 2를 사용한 결과는 Fig. 7에서 각각 보여준다. 계인상수(α_g)를 크게 사용함으로써 발전기 회전속도, 발전기 토크, 출력파워, 출력계수, 발전기 비선형 파라미터의 정상상태까지 수렴하는 응답특성이 향상됨 확인할 수 있다. 제안된 토크제어 방법을 사용하면 출력계수 최대값에 더 빠르게 도달함을 확인할 수 있는데, 이는 제안된 방법이 최적모드제어를 이용하는 기존의 토크제어 방법보다 출력파워를 생산함에 있어서 더 효율적임을 보여주는 것이다.

다음으로 Fig. 5의 난류풍속에 대하여 발전기 회전속도, 발전기 토크, 출력파워, 출력계수, 발전기 비선형 파라미터의 응답은 Fig 8과 같다. 제안된 토크제어 방법이 최적모드제어를 이용하는 기존의 토크제어 방법보다 응답특성이 향상되었음을 확인할 수 있는데, 계인상수(α_g)의 값을 2로 사용할 경우 출력파워의 실효치가 1.19% 정도 증가하였다.

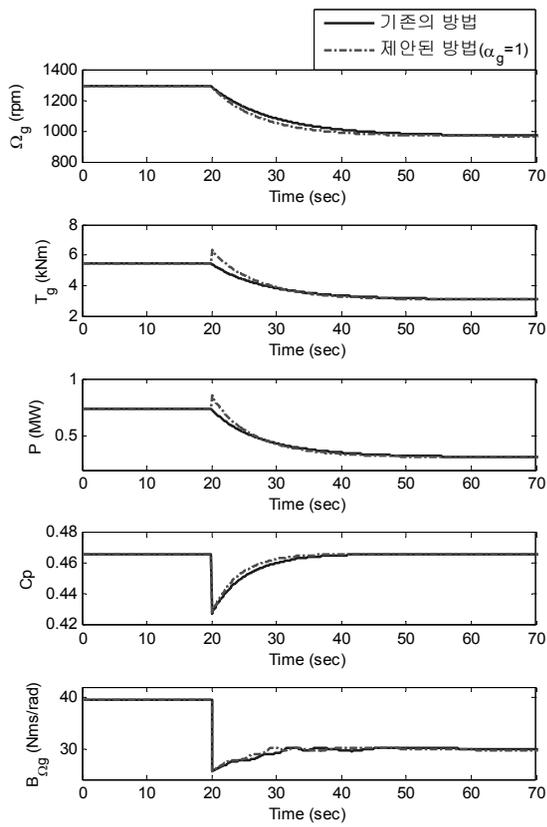


Fig. 6 Comparison of responses to step wind speed

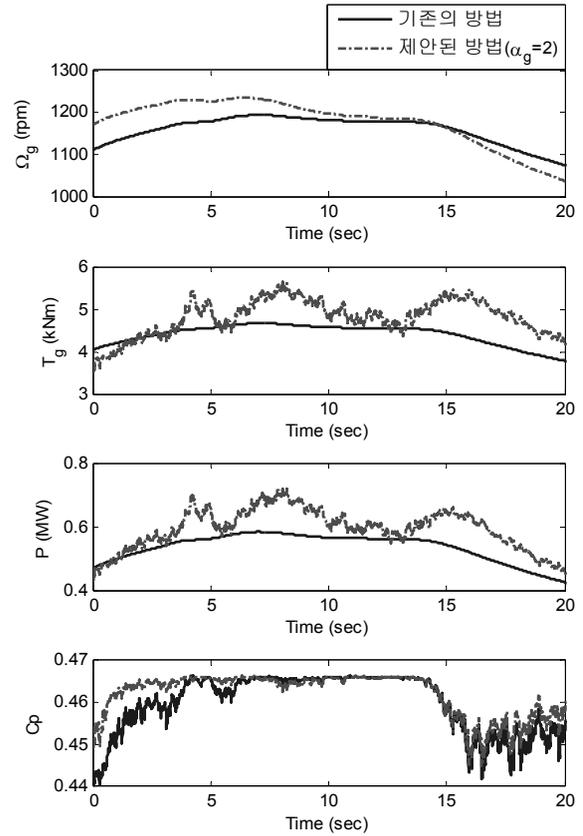


Fig. 8 Comparison of responses to turbulence wind speed

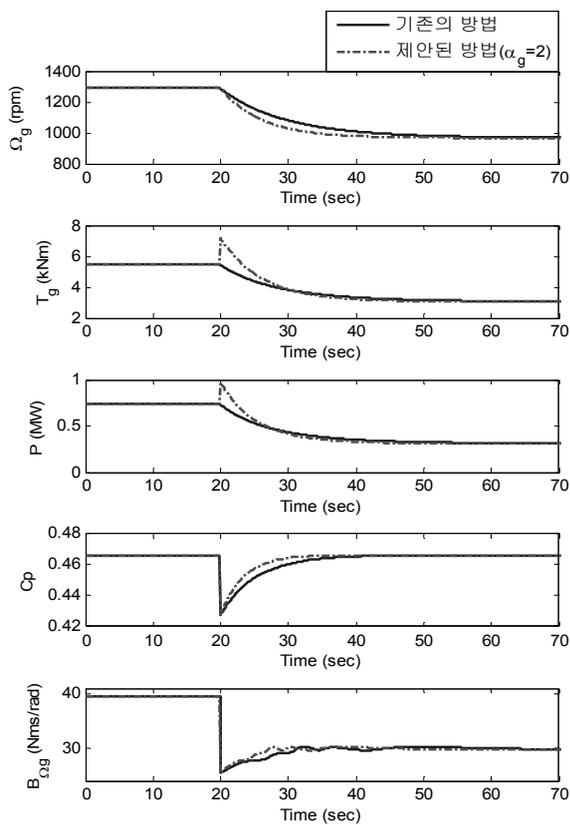


Fig. 7 Comparison of responses to step wind speed

5. 결 론

본 논문에서는 최적모드제어를 사용하는 기존의 토크제어 방법을 바탕으로 풍력터빈의 응답속도를 향상하기 위한 토크제어 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 공기역학적 토크의 로터속도 비선형 파라미터와 양의 값인 계인상수를 제어계인으로 이용하는 방법이다. 로터속도 비선형 파라미터는 실시간적으로 계산하여 사용하는데, 이를 실시간적으로 구하기 위해 Simulink를 이용하여 구현하였다. 2MW 풍력터빈을 대상으로 계단풍속 및 난류풍속에 대한 수치실험을 수행하였고 그 결과를 기존의 토크제어 방법과 비교하였다. 로터속도 비선형 파라미터를 제어계인으로 사용함으로써 발전기 응답을 더 빠르게 하고 출력파워를 향상할 수 있음을 보였다. 그리고 계인상수를 크게 사용함으로써 응답특성을 빠르게 하고 출력파워를 향상할 수 있음을 보였다. 계인상수 2를 사용한 경우 최적주속비 구간에서 평균풍속이 7 m/s이고 난류강도 10%인 풍속에 대하여 출력파워의 실효치가 최적모드제어만을 사용한 기존의 토크제어 방법보다 약 1.2% 증가함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2011년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업의 지원(No. 2011-0004862)과, 2011(3차년도)년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원(No. 20093021020030)을 받아 수행한 연구과제입니다.

참고문헌

- (1) Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. and Bossanyi, E., 2001, Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons, Ltd.
- (2) Manwell, J. F., McGowan, J. G. and Rogers, A. L., 2002, Wind Energy Explained: Theory, Design and Application, John Wiley & Sons, Ltd.
- (3) Bianchi, F. D., Battista, H. D. and Mantz, R. J., 2007, "Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling and Gain Scheduling Design," Springer-Verlag.
- (4) Munteanu, I., Bratcu, A. L., Cutululis, N. A. and Ceanga, E., 2008, "Optimal Control of Wind Energy Systems," Springer-Verlag.
- (5) Leithead, W. E. and Connor, B. 2000, "Control of variable speed wind turbines: dynamic models," International Journal of Control, Vol. 73, No. 13, pp. 1173~1188.
- (6) Leithead, W. E. and Connor, B. 2000, "Control of variable speed wind turbines: design task," International Journal of Control, Vol. 73, No. 13, pp. 1189~1212.
- (7) 임채욱, 2011, "가변속도 가변피치 풍력터빈의 공기역학적 토크의 비선형 특성에 관한 고찰," 유체기계공업학회, 제14권 제2호, pp. 29~34.
- (8) 임채욱, 서강운, 2010, "난류풍속에 대한 MW급 풍력터빈의 토크제어 방법에 따른 응답 특성 비교," 대한기계학회 논문집 A권, 제34권 제12호, pp. 1885~1891.