

토크모드 기반의 토크 제어 방법을 적용한 2.75MW 풍력터빈의 동적 응답

임채욱*†

Dynamic Response of a 2.75MW Wind Turbine Applying Torque Control Method Based on Torque-Mode

Chae-Wook Lim*

Key Words : Wind Turbine(풍력터빈), Torque Control(토크 제어), Torque-Mode(토크모드), Optimal Mode Gain(최적모드게인), Aerodynamic Torque Control(공력토크), Generator Acceleration(발전기 가속도)

ABSTRACT

Torque control methods of wind turbine are mainly classified into two methods: torque-mode and speed-mode methods. The traditional torque-mode method, in which generator torque proportional to square of generator speed is determined, has been chosen in many wind turbines but its response is slower as they are larger in multi-MW size. Torque control methods based on both speed-mode and torque-mode can be used to make response of wind turbine faster. In this paper, two torque control methods based on the traditional torque-mode method are applied to a 2.75 MW wind turbine. It is shown through some simulation results for real turbulence wind speeds that torque control method based on torque-mode has the merit of reducing fluctuations of generated power than PI controller based on speed-mode.

1. 서 론

최근의 풍력터빈은 발전기의 회전속도와 블레이드 피치각 모두를 제어하는 가변속도-가변피치 형태의 수 MW급이 세계시장의 주류를 이루고 있다.^(1, 2) 정격출력 이하의 풍속에서의 토크제어의 목적은 최대의 파워를 발생하는 것이다. 토크제어를 통하여 최대의 파워를 생산하기 위해서는 출력계수가 항상 최대값을 유지하도록 제어되어야 한다.^(3, 4) 이의 목적을 달성하기 위한 토크제어 로 선형 제어 및 비선형 제어 방법들이 연구되었는데,^(3~10) 이들 풍력터빈의 토크제어 방법은 제어 구조면에서 크게 토크모드 방법과 속도모드 방법으로 구분될 수 있다.

전통적으로 많이 사용되는 토크제어 방법으로는 발전기의 토크크기를 발전기의 회전속도의 제곱에 비례하도록 하는 토크모드 방법이 있다.^(3~6) 이 토크모드 방법은 발전기 속도와 발전기 토크의 정상상태 특성을 나타내는 최적모드게인

을 이용하는 비선형제어 방법으로, 소형 풍력터빈뿐만 아니라 MW급의 대형 풍력터빈에도 발전기의 토크제어 방법으로 실제 산업에서 많이 사용되고 있다. 그러나 최적모드게인을 이용하는 토크모드 방법은 발전기의 회전속도가 정상상태인 경우만을 고려한 것이므로, 풍속이 빠르게 변하는 과도상태인 경우에는 발전기 속도의 응답성이 좋지 않다. 또한 최적모드게인을 이용하는 토크모드 방법은 풍력터빈이 수 MW급으로 대형화될수록 발전기 속도의 응답성이 좋지 않는데, 그 이유는 로터(블레이드와 허브)의 회전관성이 커져 풍력터빈의 시상수가 커지지 때문이다. 그러므로 최적모드게인을 이용하는 전통적인 토크모드 방법보다 응답속도를 빠르게 하기 위한 토크제어 방법에 대한 연구가 진행되어 왔다.^(3~9)

MW급 풍력터빈의 응답속도를 빠르게 하기 위한 토크제어 방법은 토크모드와 속도모드에서 모두 가능하다. 속도모드에서는 발전기 회전속도의 오차를 줄이는 것이 목적이며, 이 오차를 줄이기 위해 선형제어기를 사용하는데 PI 제어기가

* 한밭대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University)

† 교신저자(Corresponding Author), E-mail : cwlim@hanbat.ac.kr

실제적으로 가장 많이 사용된다.^(4,5) 속도모드에서 PI 제어기와 같은 선형제어기를 사용하면 최적모드게인을 이용하는 전통적인 토크모드 방법보다 응답속도를 빠르게 할 수 있는 장점이 있다. 저자의 이전 연구에서도 난류풍속에 대한 PI 제어기 형태의 속도모드 방법에 대한 MW급 풍력터빈의 응답 특성을 확인해 보았다.⁽¹¹⁾

토크모드에서는 전통적인 최적모드게인을 이용하는 토크모드 방법에 추가적인 토크크기를 조절함으로 응답속도를 빠르게 할 수 있다. 추가적인 토크크기를 조절하는 방법으로는 발전기 회전가속도를 이용하는 방법과 공력 토크를 이용하는 방법이 제시되었다.⁽⁴⁾ 그러나 실제 난류풍속을 고려하여 수 MW급 풍력터빈에 대한 이들 방법들을 적용한 응답특성은 보이지 않았다. 그러므로 본 연구에서는 토크모드 방법에 근거하여 풍력터빈의 응답속도를 향상시키는 이 두 방법을 2.75 MW 풍력터빈에 적용하여 난류풍속에 대한 응답 특성을 수치실험을 통하여 확인하고자 한다. 그리고 이 두 방법에 대한 응답 특성을 속도모드 기반의 PI 제어기를 적용한 응답 특성과 비교하여 토크모드 방법의 장점을 보이고자 한다.

2. 전통적인 토크모드 제어 방법

2.1. 토크제어의 목적

바람과 로터 블레이드의 상호작용에 의한 공기역학적 출력력과 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.

정격풍속 이하에서의 풍력터빈의 제어는 토크제어에 의해 수행되며 이 경우의 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.

$$\Omega_r(t) = \Omega_g(t)/n_{gb} \quad (4)$$

여기서 Ω_g 는 발전기 속도이고 n_{gb} 는 기어박스 증속비이다. 식 (1)의 공력 출력의 최대 출력파워(P_{max})를 구하면 식 (5)와 같다.

$$P_{max}(t) = K_{opt} \Omega_g^3(t) \quad (5)$$

여기서 K_{opt} 는 최적모드게인으로써 식 (6)과 같다.

$$K_{opt} = \frac{1}{2\lambda_{opt}^3 n_{gb}^3} \pi \rho R^5 C_{p,max} \quad (6)$$

식 (6)의 양변을 Ω_g 로 나누면 발전기 토크는 식 (7)과 같이 표현된다.

$$T_g(t) = K_{opt} \Omega_g^2(t) \quad (7)$$

최적모드게인을 이용한 토크제어는 풍속의 크기에 따라 최적 주속비를 얻기 위하여 토크-속도 정상상태 관계특성을 나타내는 식 (7)을 이용하여 발전기 토크크기(T_g)를 발전기 속도(Ω_g)의 제곱에 비례하도록 제어하는 것이다. 식 (7)을 블록선도로 표현하면 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 풍력터빈 시스템을 1-질량 모델로 고려하면 발전기 토크입력과 발전기 속도 사이의 개루프 전달함수는 식 (8)과 같이 표현된다.

$$\frac{\Omega_g(s)}{T_g(s)} = \frac{-1}{J_{eq}s + B_{eq}} \quad (8)$$

여기서 J_{eq} 는 등가 회전관성모멘트이고 B_{eq} 는 등가 감쇠이다. 식 (8)의 분모를 보면 J_{eq} 값은 제어 관점에서 시스템의 시상수와 관련 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서 수 MW급의 대형 풍력터빈의 경우 큰 회전관성모멘트를 가지는 블레이드로 인해 정상상태로 수렴하는 응답속도가 느려지는 단점을 가진다.

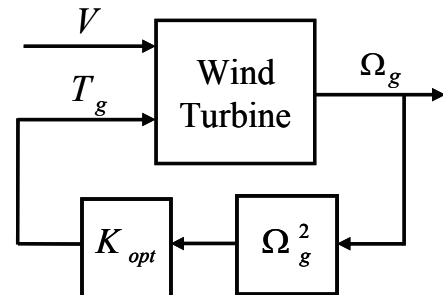


Fig. 1 Traditional torque-mode control method using optimal mode gain

3. 응답속도 향상을 위한 풍력터빈의 토크제어 방법

3.1. 발전기 가속도를 이용한 토크모드 제어

발전기 가속도를 이용한 토크모드 제어는 Fig. 2와 같이 최적모드게인을 이용한 토크모드 제어에 바탕을 두고 발전기 가속도를 이용하여 추가적인 토크입력 크기를 제어해 주는 방법이다. 추가적인 토크입력은 발전기 속도를 피드백 받아 미분한 값에 발전기 가속도 게인(K_d)을 곱하여 계산된 토크크기를 발전기 토크크기에서 빼 주는 방법이다. 이를 식으로 나타내면 식 (9)와 같다.

$$T_g(t) = K_{opt}\Omega_g^2(t) - K_d\dot{\Omega}_g(t) \quad (9)$$

최적모드게인을 이용하여 풍력터빈의 토크모드 제어를 수행할 때 풍속의 변화가 급격한 경우에는 응답속도가 느리지만 발전기 속도의 응답을 빠르게 하기 위하여 토크입력 크기를 발전기 가속도를 이용하여 조절하면 응답은 빨라진다. Fig. 2에서 풍력터빈 시스템을 1-질량 모델로 고려한 경우 K_d 에 의해 조절되는 발전기 토크입력을 포함한 발전기 토크입력과 발전기 속도 사이의 개루프 전달함수는 식 (10)으로 표현된다.

$$\frac{\Omega_g(s)}{T_g(s)} = \frac{-1}{(J_{eq} - K_d)s + B_{eq}} \quad (10)$$

식 (10)과 식 (8)을 비교해 보면 발전기 가속도를 피드백하여 토크제어를 수행하는 방법은 풍력터빈의 회전관성모멘트를 줄여주는 물리적인 효과가 있는 것을 확인할 수 있고, 이로 인해 응답속도의 향상을 기대할 수 있게 된다.

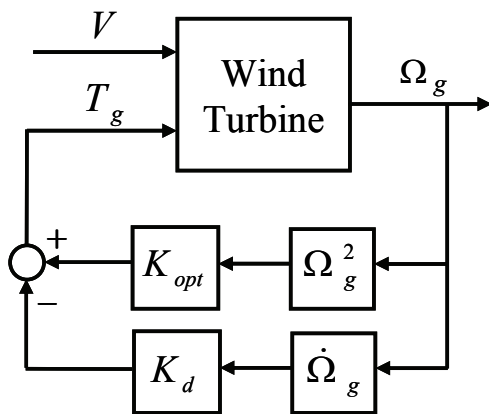


Fig. 2 A torque control method using generator acceleration

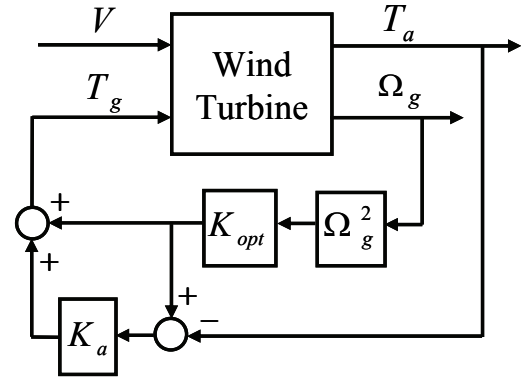


Fig. 3 A torque control method using aerodynamic torque

3.2. 공력 토크를 이용한 토크모드 제어

공력 토크를 이용한 토크제어는 Fig. 3과 같이 최적모드게인을 이용한 토크모드 제어에 바탕을 두고 풍력터빈의 토크제어를 수행할 때 발전기의 토크(T_g)와 공력 토크(T_a)의 오차를 공력 토크 비례 게인(K_a)을 통하여 보상하도록 하는 방법이다. 이를 식으로 나타내면 식 (11)과 같다.

$$T_g(t) = K_{opt}\Omega_g^2(t) + K_a(K_{opt}\Omega_g^2(t) - T_a(t)) \quad (11)$$

기어박스가 있는 경우 T_a 는 식 (2)의 T_r 을 발전기 측면에서 등가의 토크값으로 표현한 것이다. 공력 토크를 이용한 토크제어는 발전기의 속도가 정상상태에 도달하여 일정한 속도로 회전하는 경우는 공력 토크와 발전기 토크의 크기가 같아져 평형을 이루게 된다. 풍속의 변화가 있을 때 공력 토크와 발전기 토크의 크기는 평형이 깨지게 된다. 즉, 풍속이 더 커지는 경우에는 공력 토크가 발전기 토크보다 더 커지게 되고, 풍속이 더 작아지는 경우에는 공력 토크가 발전기 토크보다 더 작아지게 된다. 그러므로 Fig. 3과 같은 제어 방법을 사용하면 풍속의 급격한 변화에 대하여 발전기 속도의 과도상태 응답속도의 향상을 기대할 수 있다.

4. 수치실험 결과

4.1. 2.75 MW 풍력터빈

본 논문에서는 정격출력이 2.75 MW인 풍력터빈(DOWEC 2.75MW⁽¹⁰⁾)을 고려하였고, 수치실험을 수행하기 위하여 1-질량 모델을 Matlab/Simulink로 구현하였다. 수치실험에서 사용된 풍력터빈의 공력 출력은 최적주속비(λ_{opt})가 9.5일 때 출력계수 최대값($C_{p,max}$)은 0.48이다⁽¹¹⁾. 최적 주속비 구간의 풍속 범위는 5.2~7.3m/s이고 발전기 속도 범위는 728~1044rpm이다. 정격풍속 이하의 블레이드 최적 피치각은 1도이다.

4.2. 수치실험 방법

수치실험은 Fig. 4의 반사인파 풍속과 Fig. 5의 난류풍속을 이용하였다. Fig. 4의 반사인파는 돌풍 형태의 풍속을 나타내는 것으로 20초 동안 풍속이 5.5m/s에서 7m/s로 빠르게 변화하는 경우이다. Fig. 5는 실제 난류풍속을 나타내는 것으로 10분 동안 평균풍속은 6.2m/s이고 난류강도가 10%인 경우를 고려한 경우이다. 최적모드제어를 이용한 전통적인 토크모드 제어 방법(Case 1)과 PI 제어를 이용한 속도모드 제어 방법(Case 2)의 동적 응답 특성은 이전 논문에서 보였다⁽¹¹⁾. 본 수치실험에서는 발전기 가속도를 이용한 토크모드 제어 방법(Case 3)과 공력 토크를 이용한 토크모드 제어 방법(Case 4)의 응답 특성을 PI 제어를 이용한 속도모드 제어 방법(Case 2)과 비교한다. 선정된 게인값은 Table 1과 같다.

4.3. 수치실험 결과

Fig. 6과 Fig. 7은 Fig. 4의 반사인파 풍속에 대한 주속비, 발전기 속도, 발전기 토크, 출력파위의 응답을 보여주고 있다. Fig. 6은 Case 3을 Case 1과 Case 2와 비교하고 있으며, Fig. 7은 Case 4를 Case 1과 Case 2와 비교하고 있다. Case 3과 Case 4의 응답은 거의 같다. Case 2, Case 3, Case 4 모두는 Case 1보다 발전기 속도 응답이 빠르고 최적 주속비 값인 9.5에 더 빠르게 도달함을 확인할 수 있다. Case 1의 경우 주속비, 발전기 속도, 발전기 토크, 출력파위 모두 약 100초에서 정상상태에 도달함을 알 수 있다. Case 2, Case 3, Case 4의 경우 주속비와 발전기 속도는 약 80초에서, 발전기 토크와 출력파위는 약 90초에서 정상상태에 이르는 것을 알 수 있는데, 이들 모두 Case 1보다 응답속도도 빠르고 정상상태에 빨리 도달함을 확인할 수 있다. Case 3과 Case 4는 Case 2와 비교할 때 정상상태에 도달하는 시간은 거의 비슷하지만 과도응답 특성이 다름을 확인할 수 있다. Case 3과 Case 4의 경우 발전기 속도, 발전기 토크, 출력파위 응답은 모두 정상상태값 이상의 초과가 발생하지 않는다. 그러나 Case 2의 경우 Case 3과 Case 4보다 초기 응답속도가 빠르기는 하지만 이들 응답 모두에서 초과가 발생한다. Case 2의 경우 제어제어를 작게 선정하면 이들 응답에서 초과가 줄어들긴 하지만 여전히 초과가 발생하고 정상상태에 이르는 시간이 길어진다⁽¹¹⁾. 그러므로 PI 제어를 이용한 속도모드 제어 방법(Case 2)은 토크모드 기반의 토크제어 방법(Case 3과 Case 4)과 정상상태 응답특성이 같지만, 풍속 변화 구간(30~50초)인 과도응답 구간에서 토크모드 기반의 토크제어 방법(Case 3과 Case 4)보다 발전기 토크 및 발전기 속도의 변동이 더 커져 출력파위의 변동이 더 커지는 단점을 가짐을 확인할 수 있다.

다음으로는 이런 출력파위의 과도응답 특성이 실제 난류 풍속에서 출력파위에 미치는 효과를 PI 제어를 이용한 속

도모드 제어 방법(Case 2)과 토크모드 기반의 제어 방법(Case 3과 Case 4)과 정략적으로 비교하고자 한다. 난류강도가 10%인 Fig. 5의 난류풍속에 대한 주속비, 발전기 속도, 발전기 토크, 출력파위의 응답은 Fig. 8과 Fig. 9와 같다. Fig. 8은 Case 3과 Case 2를 비교하여 보여주고 있고, Fig. 9는 Case 4와 Case 2를 비교하여 보여주고 있다. Case 3과 Case 4의 난류풍속에 대한 응답은 반사인파 풍속의 경우와 같이 거의 같다. Case 3과 Case 4는 Case 2보다 발전기 토크와 출력파위 면에서 변동이 작은 것을 확인할 수 있다. Case 2의 경우 발전기 토크와 출력파위의 변동이 너무 커서 크기가 0이 되는 경우가 많이 발생하는 비실용적인 결과를 보임을 확인할 수 있다. 주속비, 발전기 속도, 발전기 토크와 출력파위의 평균값과 표준편차는 Table 2에서 보여주고 있다. 출력파위 면에서 살펴보면 Case 3과 Case 4는 Case 2와 평균값은 거의 같지만 표준편차가 작음을 확인할 수 있다. Case 2는 Case 3과 Case 4보다 10%의 난류풍속에 대하여 출력파위의 표준편차 약 110% 정도 크게 증가하였다.

Table 1 Designed controller gains

Cases	Gain values
Case 1	$K_{opt} = 0.6292 \text{ Nmsec}^2 / \text{rad}^2$
Case 2	$K_p = 486.2 \text{ Nmsec} / \text{rad}$ $K_i = 43.6 \text{ Nm} / \text{rad}$
Case 3	$K_d = 1400 \text{ Nmsec}^2 / \text{rad}$
Case 4	$K_a = 0.5$

Table 2 Comparison of responses for turbulence wind speed

		Case 2	Case 3	Case 4
TSR	평균값	9.5595	9.5897	9.5900
	표준편차	0.6430	0.6764	0.6784
Ω_g (rpm)	평균값	875.45	875.95	875.96
	표준편차	84.618	59.778	59.609
T_g (kNm)	평균값	5.2879	5.3008	5.3008
	표준편차	2.9997	1.3112	1.2915
P (MW)	평균값	0.4909	0.4911	0.4910
	표준편차	0.2912	0.1406	0.1389

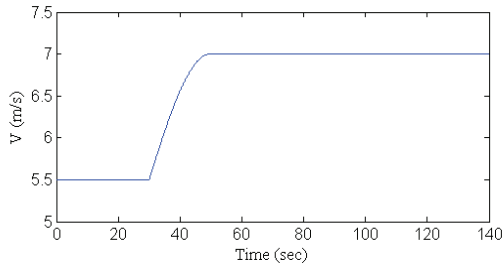


Fig. 4 Half sine wave wind speed

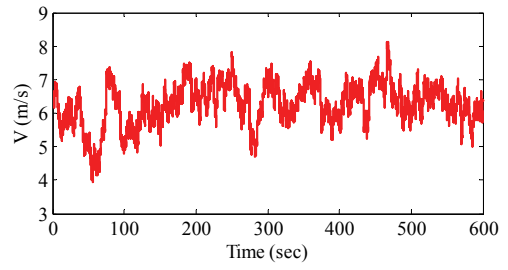
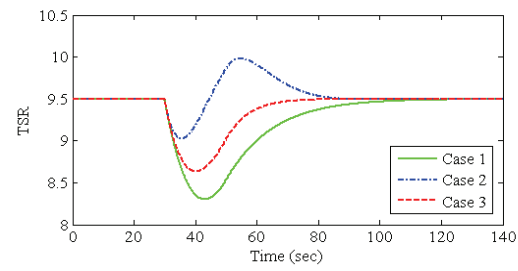
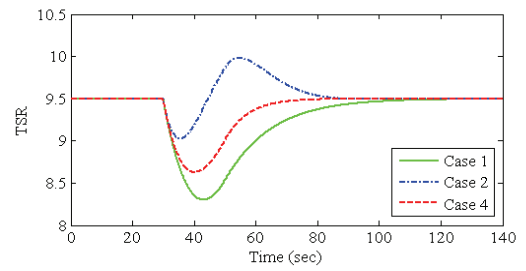


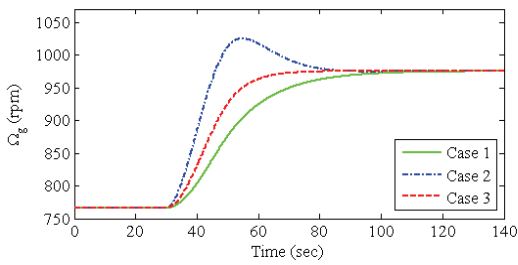
Fig. 5 Turbulence wind speed



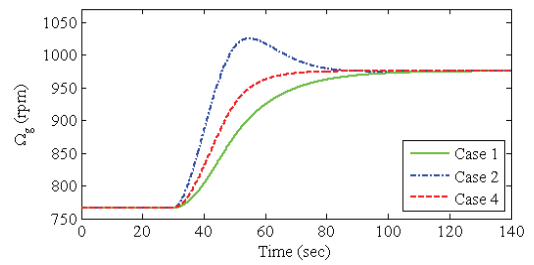
(a) Tip speed ratio



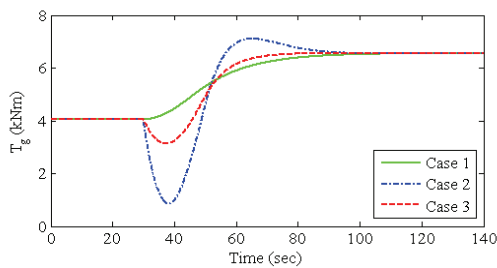
(a) Tip speed ratio



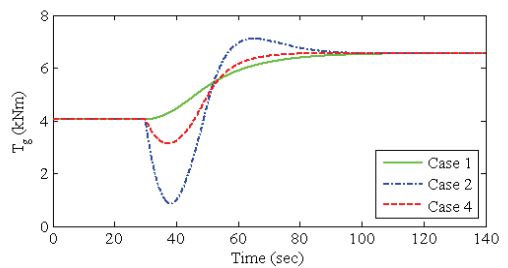
(b) Generator speed



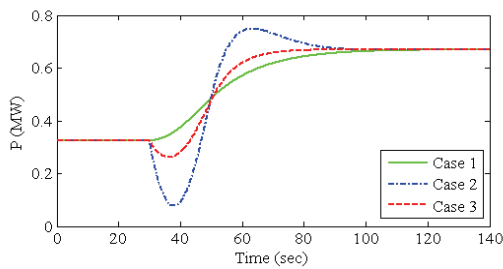
(b) Generator speed



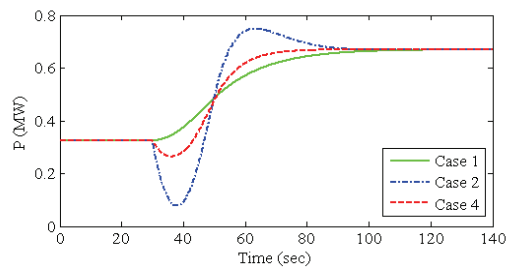
(c) Generator torque



(c) Generator torque



(d) Power



(d) Power

Fig. 6 Comparison of responses to half sine wave wind speed: Case 3 & Case 2

Fig. 7 Comparison of responses to half sine wave wind speed: Case 4 & Case 2

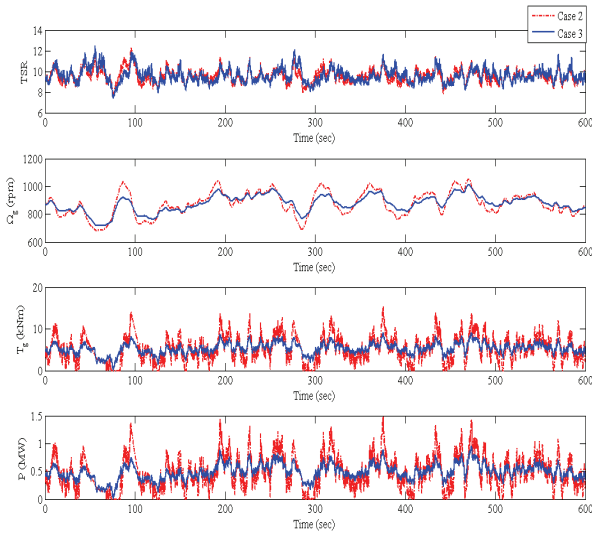


Fig. 8 Comparison of responses to turbulence wind speed: Case 3 & Case 2

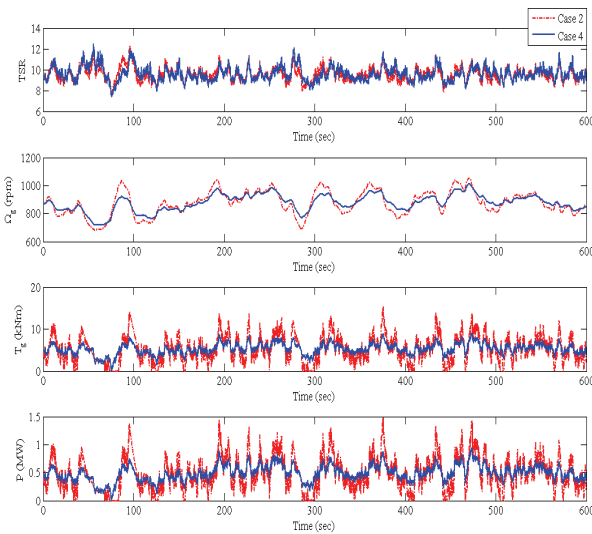


Fig. 9 Comparison of responses to turbulence wind speed: Case 4 & Case 2

5. 결론

본 논문에서는 MW급 풍력터빈의 응답속도를 향상하기 위한 토크제어 방법 중 토크모드 기반의 토크제어 방법의 응답 특성을 확인해 보았다. 전통적인 최적모드계인을 이용하는 토크모드 방법에 추가적인 토크크기를 조절함으로써 응답속도를 빠르게 하는 토크모드 기반의 제어 방법으로 발전기 가속도를 이용하는 방법과 공력 토크를 이용하는 방법을 적용하였다. 2.75 MW 풍력터빈을 대상으로 반사인과 풍속 및 난류 풍속에 대한 수치실험을 수행하고 그 응답 결과를 PI 제어기를 이용한 속도모드 제어 방법의 응답과 비교하였다. 토크모드 기반의 제어 방법과 속도모드 제어 방법 모두 전통적인

최적모드계인을 이용하는 토크모드 방법보다 응답속도를 빠르게 하여 정상상태에 빨리 도달함을 확인할 수 있다. 토크모드 기반의 제어 방법은 속도모드 제어 방법보다 작은 토크 변동으로 정상상태값에 도달하게 하고 정상상태값 이상의 초과가 발생하지 않는 장점이 있음을 확인하였다. 그러나 속도모드 제어 방법은 정상상태값 이상의 초과가 발생하고 토크의 변동이 커서 출력파워의 변동을 크게 유발하게 됨을 확인하였다. 난류강도가 10%인 난류풍속에 대한 수치실험 결과 토크모드 기반의 제어 방법은 속도모드 제어 방법과 출력파워의 평균값은 거의 같지만 출력파워의 변동을 크게 줄일 수 있는 장점이 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2012년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업의 지원(No. 2012-0002397)과 한밭대학교 연구교원 연구과제(과제명: 로터-블레이드 하중모델 및 하중제어 기술 개발)의 지원을 받아 수행한 연구과제의 결과입니다.

참고문헌

- (1) Hansen, A. D. and Hansen, L. H., 2007, "Wind Turbine Concept Market Penetration over 10 Years," Wind Energy, Vol. 10, No. 1, pp. 81~97.
- (2) Joselin Herberta, G. M., Iniyamb, S., Sreevalsanc, E. and Rajapandian, S., 2007, "A Review of Wind Energy Technologies," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 11, pp. 1117~1145.
- (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) Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. and Bossanyi, E., 2001, Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons, Ltd.
- (5) Bossanyi, E., 2000, "The Design of Closed Loop Controllers for Wind Turbines," Wind Energy, Vol. 3, pp. 149~163.
- (6) Munteanu, I., Bratcu, A. L., Cutululis, N. A. and Ceanga, E., 2008, Optimal Control of Wind Energy Systems, Springer-Verlag.
- (7) Munteanu, I., Cutululis, N. A., Bratcu, A. I. and Ceangă, E., 2005, "Optimization of Variable Speed Wind Power Systems Based on a LQG Approach," Control Engineering Practice, Vol. 13, No. 7, pp. 903~912.
- (8) Muljadi, E., Pierce, K. and Migliore, P., 2000, A Conservative Control Strategy for Variable-Speed Stall-Regulated Wind Turbines, Technical report NREL/CP-500-24791, National Renewable Energy

- Laboratory, Colorado, U.S.A.
- (9) Cutululis, N. A., Ceangă, E., Hansen, A. D. Srensen, P., 2006, "Robust Multi-Model Control of an Autonomous Wind Power System," *Wind Energy*, Vol. 9, No. 5, pp. 399~419.
- (10) Van der Hooft, E. L., Schaak, P. and Van Engelen, T. G., 2003, *Wind Turbine Control Algorithms*, Technical report ECN-C-03-111, ECN Petten.
- (11) 임채욱, 서강운, 2010, "난류풍속에 따른 MW급 풍력터빈의 토크제어 방법에 따른 응답 특성 비교", *대한기계학회 논문집 A권*, 제34권, 제12호, pp. 1885~1891.