

난류풍속에 대한 MW급 풍력터빈의 토크제어 방법에 따른 응답 특성 비교

임채욱*† · 서강윤*

* 한밭대학교 기계공학과

Comparison of Response Properties Determined in Two Torque Control Methods for a 2.75-MW Wind Turbine Under Turbulence Wind Speed

Chae Wook Lim*† and Kang Yoon Seo*

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

(Received August 27, 2010 ; Revised October 13, 2010 ; Accepted October 21, 2010)

Key Words: Wind Turbine(풍력터빈), Torque Control(토크제어), Torque Mode Control(토크모드 제어), Speed Mode Control(속도모드 제어), Power Fluctuation(과위 변동), Power Quality(과위 질), Turbulence Wind Speed(난류풍속)

초록: 풍력터빈의 토크제어는 정격풍속 이하에서 매우 중요하다. 토크제어의 주된 목적은 바람이 가진 공기역학적 파워로부터 최대의 파워를 얻도록 하는 것이다. 풍력터빈의 토크제어 방법은 토크모드 제어와 속도모드 제어로 크게 두 경우로 구분된다. 토크모드 제어는 풍력터빈에서 잘 알려지고 전통적으로 사용되는 방법으로 발전기 회전속도의 제곱에 비례하도록 발전기의 토크크기를 발생시킨다. 속도모드 제어에서는 발전기의 토크크기를 발생하기 위하여 PI 제어기를 사용한다. 본 논문에서는 실제 풍속이 난류인 점을 고려하여 2.75 MW 풍력터빈을 대상으로 두 토크제어 방법을 적용한 수치실험 결과를 제시하고 응답특성을 비교한다.

Abstract: Torque control of wind turbines is important when the wind speed is below the rated speed. The main objective of torque control is to extract the maximum power from the potential aerodynamic power of the wind. Torque control methods for wind turbines are classified as torque-mode control and speed-mode control. In torque-mode control, which is well known and traditionally used in many wind turbines, the torque demand of the generator is proportional to the square of the generator speed. In speed-mode control, a PI controller is used to generate the appropriate torque demand of the generator. In this study, the two torque control methods mentioned above are applied to a 2.75-MW wind turbine; simulation results for real turbulence wind speeds are presented, and the response properties are compared.

1. 서론

풍력터빈에서는 바람이 가진 에너지로부터 전기를 생산하기 위해서는 제어가 필수적이다. 최근의 풍력터빈은 발전기의 회전속도가 가변적이고 블레이드 피치각이 가변적인 가변속도-가변피치 형태인 수 MW급이 세계시장의 주류를 이루고 있다.^(1,2) 풍력터빈의 제어는 토크제어와 피치제어로 구성되는데, 개념적으로는 정격출력 이하의 풍속에서는 토크제어가 작동하고 정격출력 이

상의 풍속에서는 피치제어가 작동하는 것으로 구분할 수 있다. 정격풍속 이하에서의 풍력터빈의 토크제어는 매우 중요하며, 토크제어의 주된 목적은 바람이 가진 에너지로부터 최대의 파워를 뽑아내는 것이다. 토크제어를 통하여 최대의 파워를 생산하기 위해서는 출력계수가 항상 최대값을 유지하도록 제어되어야 한다. 이의 목적을 달성하기 위하여 많이 사용되는 토크제어 방법은 두 가지의 경우(토크모드 제어와 속도모드 제어)로 크게 구분된다.⁽³⁻⁶⁾

토크모드 제어방법은 발전기의 토크크기를 발전기의 회전속도의 제곱에 비례하도록 하는 것이

† Corresponding Author, cwlim@hanbat.ac.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

다. 이 토크모드 제어방법은 발전기의 회전속도가 정상상태인 경우만을 고려한 것이므로 과도상태에서는 발전기 회전속도의 응답성이 좋지 않은 것으로 알려져 있다.^(4,5) 속도모드 제어방법은 풍속에 따른 발전기 회전속도가 기준속도를 추종하도록 속도오차를 PI 제어기를 이용하여 줄이는 방법이다. 속도모드 제어방법은 토크모드 제어방법보다 발전기 회전속도의 응답속도가 빨라 과도상태에서의 응답특성이 좋은 것으로 알려져 있다.^(4,5)

이와 같은 이유들로 인해 이전의 연구에서는 풍력터빈이 수 MW급으로 대형화될수록 로터(블레이드와 허브)의 회전관성이 커지므로 토크모드 제어방법은 속도모드 제어방법보다 발전기 회전속도의 응답이 느려 수 MW급에서 사용하기에 적절치 않다고 보고하고 있다^(4,5). 그러나 풍력터빈의 토크제어의 궁극적인 목적은 발전기 회전속도의 빠른 응답특성을 얻는 것 보다는 발전기 파워 변동이 적으면서 최대의 파워를 생산하는데 있다는 점과 실제 풍속은 난류인 점을 고려하여 수 MW급 풍력터빈에 대한 토크모드 제어방법과 속도모드 제어방법의 응답특성을 확인할 필요가 있다. 본 연구에서는 2.75 MW 풍력터빈에 대하여 두 가지의 토크제어 방법을 각각 적용하여 응답 특성을 Matlab/Simulink를 이용하여 확인하고 두 방법의 응답 특성을 비교하고자 한다.

2. 토크제어의 목적 및 난류풍속

2.1 토크제어 목적

바람이 가진 파워는 풍속의 세제곱에 비례하고 식 (1)과 같이 무차원인 출력계수를 사용하여 풍속, 주속비, 피치각에 대한 함수로 표현된다.

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

여기서 ρ 는 공기밀도, R 은 블레이드 길이, β 는 블레이드 피치각, V 는 풍속, C_p 는 출력계수, λ 는 주속비(TSR: tip speed ratio)로 식 (2)와 같이 정의된다.

$$\lambda = \frac{\Omega_r R}{V} \quad (2)$$

여기서 Ω_r 은 로터속도이다.

정격풍속 이하에서의 풍력터빈의 제어는 토크 제어에 의해 수행되며 이 경우 토크제어의 목적은 최대의 출력 파워를 생산하도록 하는 것이다. 이를 위해서 풍력터빈의 회전속도를 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.

본 논문에서 사용된 출력계수는 Fig. 1과 같은데,⁽⁷⁾ 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} 와 β_{opt} 로 두면, Fig. 1의 경우 $\lambda_{opt} = 9.5$, $\beta_{opt} = 1^\circ$ 이고 이에 대한 $C_{P,max} = 0.48$ 이다. 풍력터빈의 토크제어기는 정격출력 이하에서 작동하는 것이므로, 정격풍속 이하에서는 블레이드

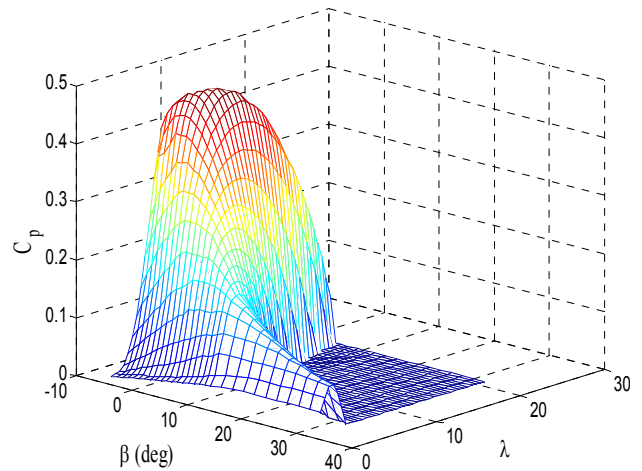


Fig. 1 Power coefficient values

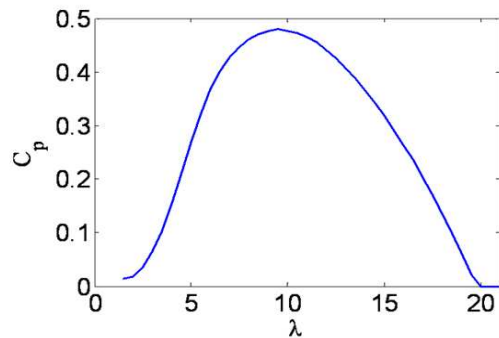


Fig. 2 Power coefficient at pitch angle of 1°

피치각은 일정한 값인 β_{opt} 로 항상 유지한다. 그러므로 정격풍속 이하에서의 출력계수는 Fig. 2에서와 같이 주속비 만에 대하여 비선형적인 함수로 표현된다.

2.2 난류풍속

실제와 유사한 풍속을 사용하여 풍력터빈 제어 시스템의 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 난류강도의 조절이 되지 않으므로, 10분 이상의 장주기의 풍속은 Van der Hoven 모델을 사용하고 10분 이하의 단주기의 풍속은 Von Karman 모델을 사용하면 난류강도를 조절할 수 있는 풍속 생성이 가능하다.⁽⁸⁾

Van der Hoven 모델을 바탕으로 10분 이상의 주기를 가지는 장주기의 풍속 특성을 30개의 점을 찍어 표현하면 Fig. 3과 같다. Fig. 3의 주파수 성분을 가지는 풍속을 시간영역에서 표현하면 식 (3)과 같다.

$$V_w(t) = \sum_{i=1}^{30} A_i \cos(w_i t + \phi_i) \quad (3)$$

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

10분 이하의 단주기를 가지는 난류성분의 풍속은 Von Karman 모델을 이용하여 표현할 수 있는데 Von Karman 모델을 분모의 차수가 2인 식으로 근사화하면 식 (4)와 같다.

$$H_F(s) = \frac{K_v(m_1 T_v s + 1)}{(T_v s + 1)(m_2 T_v s + 1)} \quad (4)$$

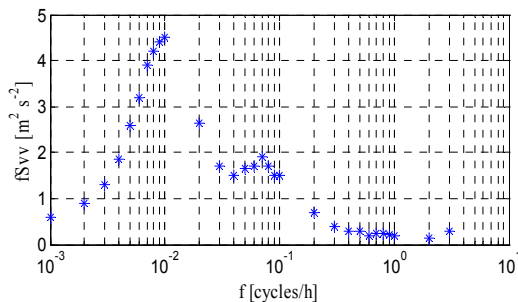


Fig. 3 Spectral model of Van der Hoven

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

임의의 평균풍속(V_m)에 대하여 임의의 난류강도(TI; turbulence intensity)를 가지는 최종적인 바람은 단주기와 장주기의 바람을 합하여 생성된다. Matlab/Simulink를 이용하여 구현된 난류풍속은 Fig. 4와 같은데, 평균풍속 6.2m/s에 대하여 난류강도가 5% 및 10%인 경우로 10분 이하의 단주기 고주파 성분이 많이 포함되어 있음을 알 수 있다.

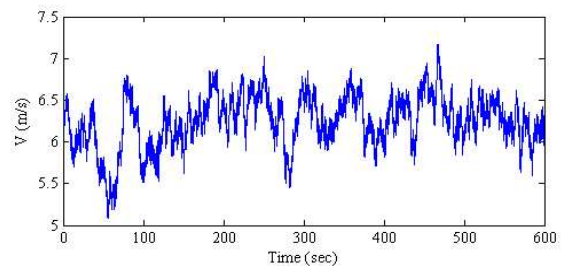
3. 토크제어 방법

3.1 토크모드 제어방법

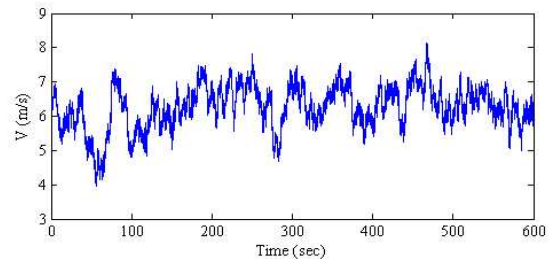
토크모드 제어방법은 Fig. 5에서와 같이 풍속의 크기에 따라 최적 주속비(λ_{opt})를 얻기 위하여 토크-속도의 정상상태 관계특성을 나타내는 식 (5)을 이용하여 발전기의 토크크기(T_g)를 발전기의 회전속도(Ω_g)의 제곱에 비례하도록 제어하는 것으로 비선형제어 방법이다.

$$T_g(t) = K_{opt} \Omega_g^2(t) \quad (5)$$

여기서 K_{opt} 는 최적모드게인으로 발전기의 토크



(a) $V_m=6.2\text{m/s}$ & $TI=5\%$



(b) $V_m=6.2\text{m/s}$ & $TI=10\%$

Fig. 4 Turbulence wind speeds

와 발전기의 회전속도 사이의 이차특성을 나타내는 계수값으로 식 (6)과 같다.

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

여기서 ρ 는 공기밀도, R 은 로터 블레이드 반경, n_{gb} 는 기어박스의 증속비이다.

식 (5)를 이용하여 발전기의 토크입력을 제어한다는 의미는 풍력터빈의 동작점에서의 정상상태의 특성을 이용하겠다는 뜻이다. 그러므로 10분 이하의 단주기 성분이 포함된 난류풍속에 대하여 과도특성에서 제어성능이 좋지 않으며, 또한 수 MW급의 대형 풍력터빈의 경우에는 큰 회전관성을 가지는 블레이드로 인해 정상상태로 수렴하는 속도가 늦어지는 단점을 가진다.

3.2 속도모드 제어방법

속도모드 제어방법은 Fig. 6에서와 같이 풍속에 따른 발전기 회전속도의 기준입력(Ω_{ref})과 피드

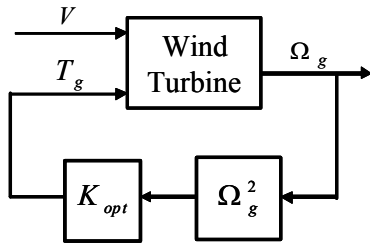


Fig. 5 Torque mode control

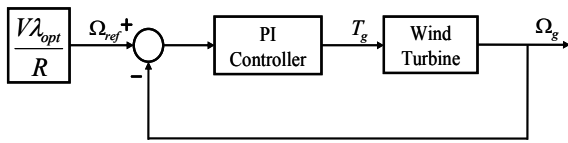


Fig. 6 Speed mode control

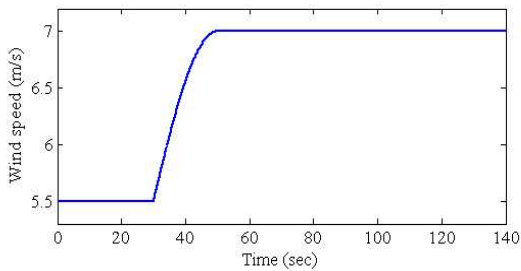
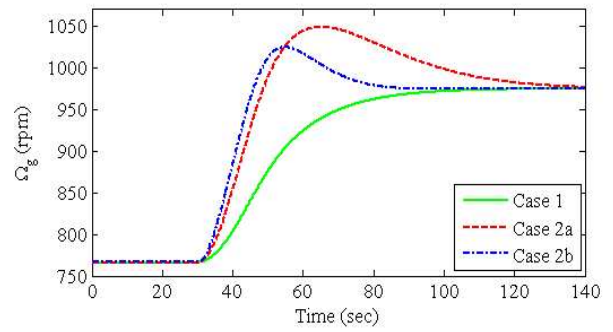
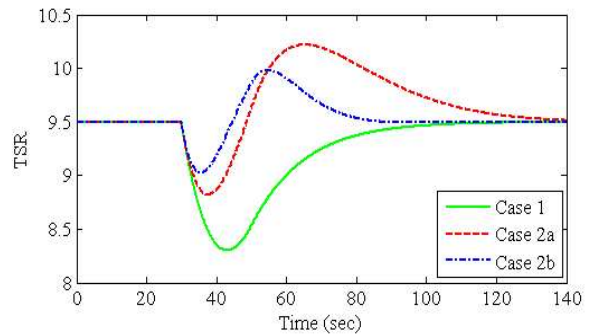


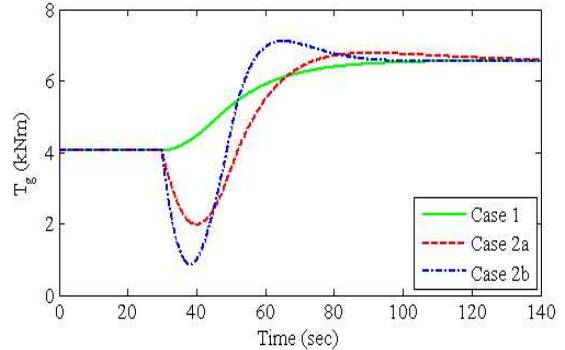
Fig. 7 Wind speed: half sine wave



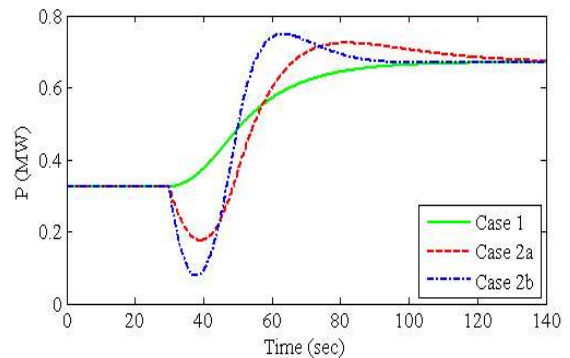
(a) Generator speed



(b) Tip speed ratio



(c) Generator torque



(d) Power

Fig. 8 Comparison of responses to half sine wave

Table 1 Physical parameter values of a 2.75 MW wind turbine

Physical parameters	Values
R	46 [m]
J_r	12.6e6 [kgm ²]
J_g	239 [kgm ²]
n_{gb}	70.65

Table 2 Simulation cases for torque and speed mode controls

토크모드 제어	Case 1	$K_{opt}=0.6292$
속도모드 제어	Case 2a	$K_p=243.1$ & $K_i=10.9$
	Case 2b	$K_p=486.2$ & $K_i=43.6$

백 받은 발전기 회전속도(Ω_g) 사이의 오차를 줄이기 위하여 식 (7)과 같이 PI 제어를 이용하는 방법이다. 속도모드 제어방법은 토크모드 제어방법보다 발전기 회전속도의 응답속도가 빨라 과도상태에서의 응답특성이 좋다. 그러나 속도모드 제어방법에서는 토크모드 제어방법에서는 불필요한 발전기의 회전속도 기준입력을 실시간적으로 결정해야 하는 단점이 있다. 발전기의 회전속도 기준입력은 정상상태에서의 최적 주속비(λ_{opt}) 정보를 이용할 경우 풍속(V)에 대한 정보가 필요하게 된다.

$$C_q(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (7)$$

여기서 K_p 는 비례 게인이고 K_i 는 적분 게인이다.

4. 수치실험 결과

본 논문에서는 정격이 2.75MW인 풍력터빈(DOWEC 2.75MW⁽⁷⁾)에 대하여 수치실험을 수행하였다. 수치실험에서 고려된 풍력터빈의 파라미터 값들은 Table 1과 같다. 공기역학적인 출력은 Fig. 1과 같고, 정상상태에서 최적 주속비(λ_{opt})가 유지되는 풍속의 범위는 5.2-7.3m/s이며 이에 대한 발전기의 회전속도 범위는 728-1044rpm이다. 토크모드 제어방법(Case 1)에서 최적모드게인

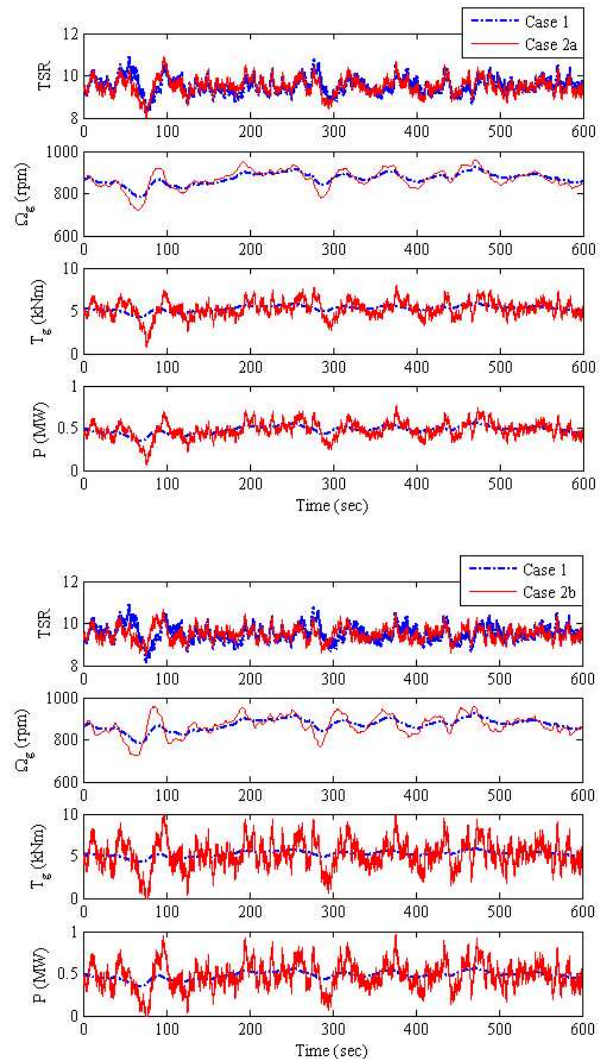


Fig. 9 Comparison of responses to turbulence wind speed (TI=5%)

(K_{opt})값은 0.6292 Nm/(rad/s)로 고정되고, 속도모드 제어방법(Case 2)에서는 PI 게인 값을 임의로 설계할 수 있다. 여기에서는 Table 2와 같이 두 경우의 PI 게인 값을 설계하여 적용하였는데, Case 2a와 Case 2b 모두 감쇠비는 0.7이 되도록 그리고 상승시간은 Case 2a에 비해 Case 2b가 빠르도록 설계하였다.

수치실험은 Fig. 7의 반사인파(half sine wave)와 Fig. 4의 난류풍속을 이용하였다. Fig. 7의 반사인파는 돌풍 형태의 풍속을 나타내는 것으로 20초 동안 풍속이 5.5 m/s에서 7.5 m/s로 빠르게 변하는 경우이다. Fig. 4는 실제 난류풍속을 나타내는 것으로 10분 동안 난류강도(TI)가 5%인 경우와 10%인 경우를 고려한 경우이다.

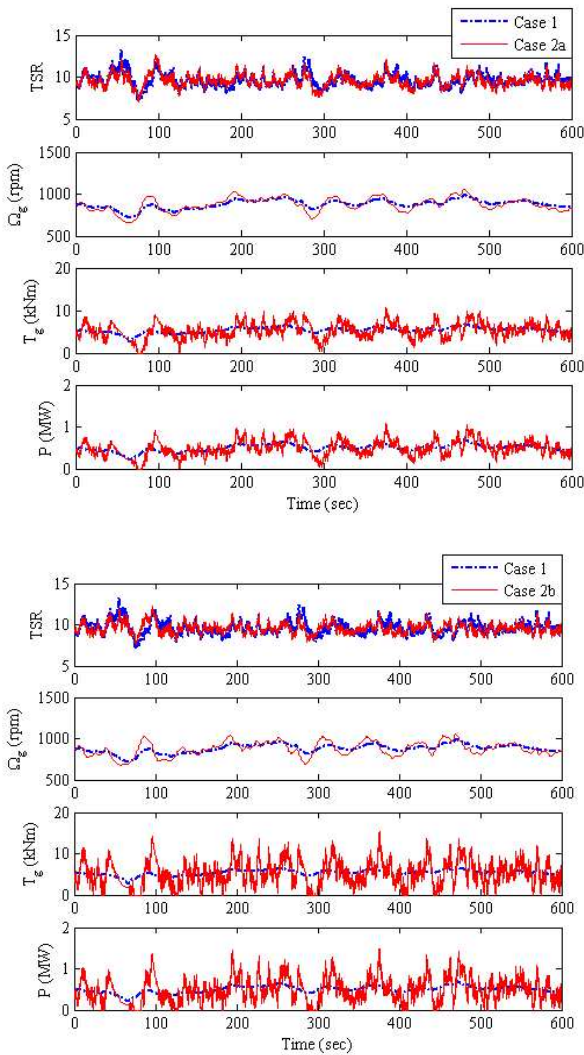


Fig. 10 Comparison of responses to turbulence wind speed (TI=10%)

Fig. 7의 반사인과 풍속에 대한 응답은 Fig. 8과 같다. 토크모드 제어방법보다 속도모드 제어방법을 적용하면 발전기의 회전속도 응답이 빠른 것을 확인할 수 있다. 또한 PI 게인값을 크게 사용한 경우의 응답속도가 더 빠른 것을 확인할 수 있다. 속도모드 제어방법을 사용하면 풍속의 변화에 대하여 발전기의 회전속도 응답이 빠르고 이에 따라 최적 주속비 값(λ_{opt})인 9.5에 빠르게 도달하게 된다. 그러나 속도모드 제어방법의 경우 발전기의 토크크기를 보면 풍속의 급격한 변화에 대하여 발전기의 회전속도 응답을 빠르게 하기 위하여 토크의 변동이 크고 이에 따라서 발전기 파워의 변동이 큼을 확인할 수 있다.

Fig. 4의 난류풍속에 대한 응답은 Fig. 9와 Fig.

Table 3 Simulation results for torque and speed mode controls

		λ (TSR)		Ω_g (rpm)		T_g (kNm)		P (MW)	
		평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차	평균	표준편차
Case 1	TI=5%	9.5210	0.3817	870.0983	26.4684	5.2285	0.3143	0.4773	0.0426
	TI=10%	9.6032	0.7894	875.8722	51.2479	5.3039	0.6341	0.4899	0.0845
Case 2a	TI=5%	9.5073	0.3801	869.5836	44.1348	5.2322	0.9622	0.4777	0.0960
	TI=10%	9.5732	0.7520	875.6957	81.1750	5.3010	1.8029	0.4909	0.1835
Case 2b	TI=5%	9.5021	0.3170	869.4730	46.9307	5.2258	1.6375	0.4775	0.1557
	TI=10%	9.5595	0.6430	875.4530	84.6209	5.2871	3.0001	0.4908	0.2913

10과 같고, 10분 동안의 주속비, 발전기 회전속도, 발전기 토크, 발전기 파워의 평균과 표준편차는 Table 3에서 보여주고 있다. 난류풍속의 고주파수 성분은 토크모드 제어방법에서는 거의 나타나지 않지만 속도모드 제어방법에서는 많이 나타남을 확인할 수 있다. 속도모드 제어방법을 사용하면 발전기 회전속도의 응답이 빨라 주속비의 평균이 최적 주속비 값(λ_{opt})인 9.5에 좀 더 가깝고 발전기 파워의 평균이 좀 더 커짐을 알 수 있으나 토크모드 제어방법에 비해 발전기 파워 평균의 증가는 1%보다 작으므로 효과적이라고 할 수 없다. 또한 속도모드 제어방법을 사용하면 발전기의 회전속도와 발전기의 토크 모두 변동이 크고 표준편차가 커져 토크제어의 최종목적인 발전기가 생산하는 파워의 변동은 난류강도가 클수록 매우 커져 파워 질이 크게 떨어지게 됨을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 풍력터빈 토크제어의 두 방법인 토크모드 제어방법과 속도모드 제어방법에 대한 응답 특성을 2.75 MW 풍력터빈에 대하여 난류풍속을 이용하여 확인해 보았다. 풍속에 대한 정보가 필요한 속도모드 제어방법은 과도상태에서 토크모드 제어방법보다 빠른 응답특성을 보이나 발전기의 토크와 파워의 변동을 크게 일으켜 난류강도가 클수록 파워 질이 좋지 않게 됨을 확인할 수 있었다. 이를 통하여 풍력터빈의 궁극적인 목적이 발전기 파워를 최대화하고 파워 변동을 줄이고자 하는 점과 실제 풍속이 난류인 점을 고려하면 MW급 풍력터빈의 경우도 소형 풍력터빈의

경우와 같이 토크제어를 적용함에 있어서 풍속에 대한 정보가 필요로 하지 않는 토크모드 제어방법이 속도모드 제어방법보다 효과적이고 실용적임을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2010년도(2차년도) 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2009T100100621).

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) Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. and Bossanyi, E., 2001, *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons, Ltd.
- (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) Van der Hooft, E.L., Schaak, P. and T.G. Van Engelen, T. G., 2003, *Wind Turbine Control Algorithms, Technical report ECN-C-03-111*, ECN Petten.
- (8) 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.