

중형 풍력터빈의 출력 및 타워 하중저감 제어기 설계

김관수* · 백인수*** · 김철진* · 김현규* · 김형길***

*강원대학교 기계융합공학과

**강원대학교 기계융합공학부

***(주)셀텍

Design of Power and Load Reduction Controller for a Medium-Capacity Wind Turbine

Kim Kwansu* · Paek Insu*** · Kim Cheol-Jin* · Kim Hyun-Gyu* · Kim Hyoung-Gil***

*Department of Advanced Mechanical Engineering, Kangwon National University

**Department of Advanced Mechanical Engineering, Kangwon National University

***Seoltech Co., Ltd.

†Corresponding author: paek@kangwon.ac.kr

Abstract

A control algorithm for a 100 kW wind turbine is designed in this study. The wind turbine is operating as a variable speed variable pitch (VSVP) status. Also, this wind turbine is a permanent magnet synchronous generator (PMSG) Type. For the medium capacity wind turbine considered in this study, it was found that the optimum tip speed ratios to achieve the maximum power coefficients varied with wind speeds. Therefore a commercial blade element momentum theory and multi-body dynamics based program was implemented to consider the variation of aerodynamic coefficients with respect to Reynolds numbers and to find out the power and thrust coefficients with respect tip speed ratio and blade pitch angles. In the end a basic power controller was designed for below rated, transition and above rated regions, and a load reduction algorithm was designed to reduce tower vibration by the nacelle motion. As a result, damage equivalent Load (DEL) of tower fore-aft has been reduced by 32%. From dynamic simulations in the commercial program, the controller was found to work properly as designed. Experimental validation of the control algorithm will be done in the future.

Keywords: 중형 풍력터빈(Medium-capacity wind turbine), 출력제어(Power control), 타워댐퍼(Tower damper), 하중저감(Loads reduction), 최대출력추종제어(Maximum Power Point Tracking Control)

기호설명

A : 로터 회전 단면적 (m^2)

C_d : 항력계수

C_l : 양력계수



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.36, No.6, pp.1-12, December 2016
<https://doi.org/10.7836/kjes.2016.36.6.001>

pISSN : 1598-6411
eISSN : 2508-3562

Received: 13 May 2016

Revised: 09 November 2016

Accepted: 30 November 2016

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

- C_P : 출력계수
- C_T : 추력계수
- F_T : 추력 (N)
- P : 전기적 출력 (W)
- P_{dem} : 발전요구량 (W)
- T_r^c : 토크 지령 (Nm)
- c_a : 부가 댐핑 (Ns/m)
- c_t : 타워의 구조 댐핑 (Ns/m)
- k_{opt} : 최적 모드 게인
- k_t : 타워의 전후방향 1차 운동모드의 강성 (N/m)
- k_I : 타워댐퍼게인
- m_t : 로터, 나셀, 블레이드 질량 (kg)
- v : 풍속 (m/s)
- x_{faft} : 나셀 전후방향 변위 (m)
- \dot{x}_{faft} : 나셀 전후방향 속도 (m/s)
- \ddot{x}_{faft} : 나셀 전후방향 가속도 (m/s^2)

그리스 문자

- Ω_g : 발전기 회전속도 [rad/s]
- Ω_r : 로터 회전속도 [rad/s]
- Ω_r^{ref} : 로터 회전속도 기준 값 [rad/s]
- β : 피치 각 [deg]
- β^c : 피치 각 지령 [deg]
- β_0 : 최적 피치 각 [deg]
- δu : 제어 입력 [N]
- λ : 선단속도비 [.]
- μ : 공기 점성계수 [Ns/m^2]
- ρ : 밀도 [kg/m^3]

1. 서론

국가 전력계통 망과 연결되어 있지 않은 도서 지역이나, 시골 지역 등 전력취약지역에 대한 해법으로 전 세계적으로 중 소형 풍력터빈이 다시 주목받고 있다. 중 소형 풍력터빈은 MW 급 이상의 대형 풍력터빈과 비교하면 상대적으로 설치 및 제작·공급이 빠르고 수리가 쉬운 장점이 있다.

하지만 풍력터빈 기술이 주로 MW 이상의 대형 풍력터빈에 치중되어 있어, 중 소형 풍력터빈에 대한 기술발전은 상대적으로 낮은 상태이다. 특히 풍력터빈을 효율적으로 운영하기 위해서 풍력터빈의 용량과 특성에 적합한 제어기는 필수적이다. 하지만 제어기 설계 기술은 풍력터빈 제조사나, 제어 솔루션 제공 업체의 은닉된 기술로서, 국내 기술 개발이 필요한 분야이다.

중 소형 풍력터빈은 대형 터빈과는 달리 블레이드의 크기가 작고 회전속도는 빠르지만, 레이놀즈수 대역이 대형 터빈과 비교하면 현저히 낮은 특징이 있다¹⁾. 따라서 제어기 설계 시 레이놀즈수 차이에 대한 양력계수(C_l)와 항력계수(C_d) 변화를 고려해야 한다. 또한 높은 회전속도로 인하여 타워 뿌리 부분 하중이 전후 방향뿐만 아니라 좌우 방향으로도 크게 걸리는 특징을 가지고 있다.

본 논문에서는 대형 풍력과 비교하여 공력특성이나 운전특성이 다른 100 kW 중형 풍력터빈을 대상으로 출력 및 하중저감 제어 알고리즘 설계를 수행하였다. 특히 공력 성능에 큰 영향을 미치는 블레이드 모델링은 대형 터빈과 달리 블레이드 길이 방향과 시동에서 종단 풍속까지의 레이놀즈수를 모두 고려하여 레이놀즈수 변화에 따른 익형의 공력 성능 변화를 적용할 수 있도록 모델링하였다. 또한 상용 MW 풍력터빈에서도 널리 사용되고 있는 제어기법을 대상 풍력터빈에 적용하여 적용 가능성을 확인하였으며, 특히 정격풍속 이하에서의 토크 제어에서는 레이놀즈수 효과를 고려하여 제어할 경우, 기존 MW 풍력터빈의 제어에 적용되는 방법 대비 풍력터빈 발전량을 증가시킬 수 있음을 증명하였다. 마지막으로 중형 풍력터빈에 맞게 제어 알고리즘의 성능을 확인하기 위하여 평균발전량, 발전량 표준편차, 타워 뿌리 부분에 걸리는 손상등가하중(DEL, Damage Equivalent Load)을 성능지표로 설정하고 비교분석을 하였다.

2. 대상 풍력터빈

본 연구에 사용된 대상 풍력터빈은 넓은 운전범위를 갖는 가변속피치(VSVP, Variable Speed Variable Pitch)제어가 가능하며, 영구자석 동기발전기(PMSG, Permanent Magnet Synchronous Generator)를 이용하는 직접구동 방식이다. 대상 풍력터빈의 간략한 제원은 아래 Table 1에 제시되어 있다. 제어 알고리즘 설계를 위해서는 물리적 외형정보뿐만 아니라 공기역학적 데이터, 물성값들이 모두 고려되어야 한다. 상세특성정보는 제조사로부터 제공받아 DNV GL's Bladed 로 모델링하였다.

Table 1 Specification of target wind turbine

Property	Units	Value
Rotor Orientation, Configuration	.	Upwind, 3blades
Rotor Diameter	m	24.194
Hub Height	m	30
Cut-in, Rated, Cut-out Wind	m/s	2.5, 9.6, 20
Maximum Cp Pitch Angle	deg	-0.8
Rated Rotor Speed	rpm	54
Rated Tip Speed	m/s	69.5
Rated Generator Torque	Nm	19,648.7
Rated Electrical Power	kW	100
Nacelle and Rotor Mass	kg	7,504
Tower Mass	kg	10,689
Tilt angle	deg	6
Cone angle	deg	0

2.1 공력 특성

풍력터빈의 블레이드에 작용하는 공력은 출력과 추력을 발생시키며 수학적으로는 각각 식(1)과 (2)로 나타낼 수 있다. 식(1)에서 알 수 있듯이 공기역학적 출력과 비례관계인 출력계수는 선단속도비(TSR, Tip Speed Ratio)와 피치 각의 함수이다. 여기서 출력계수는 에너지 변환 효율을 나타내기도 한다.

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_P(\lambda, \beta) \tag{1}$$

풍력터빈 제조사에서는 풍력터빈의 출력을 높이기 위해, 환경조건을 제외한 회전자 회전면적(A)을 증가시키거나 블레이드의 출력계수를 증가시키기 위한 노력이 이루어지고 있다.

추력은 바람에 의해 풍력터빈이 받게 되는 힘으로 블레이드 뿌리 하중, 타워 뿌리 하중에 큰 영향을 미친다. 또한 추력(F_T)은 출력과 동일하게 선단속도비(λ)와 피치 각(β)의 함수인 추력계수(C_T)에 비례하는 함수로 정의할 수 있으며 아래 식(2)로 표현된다.

$$F_T = \frac{1}{2} \rho A v^2 C_T(\lambda, \beta) \tag{2}$$

본 연구의 대상 터빈의 경우 블레이드의 길이가 11.8m이며, 코드 길이는 1m 이내이기 때문에 대형 터빈에 비해 레이놀즈수가 낮은 특징이 있다. 즉, 상대적으로 블레이드의 공력성능이 낮아지게 되며, 풍속에 따라 공력성능이 변화하게 된다. 따라서 이러한 레이놀즈수 효과를 고려하기 위하여 3D 도면에서 추출한 20여 개의 에어포일로부터 실속 이전 영역

에서는 X-Foil을 이용하여 공기역학적 데이터를 획득하였으며, 미국 국립신재생에너지연구소(NREL, National Renewable Energy Laboratory)에서 개발한 AirfoilPrep 툴을 이용하여 외삽법을 통해 실속 이후 영역의 공기역학적 데이터를 획득하였다²⁾³⁾. Fig. 1은 최적 피치 각일 때 발전을 시작하는 로터스피드에서 정격 로터스피드까지의 출력계수곡선을 나타내고 있다. Fig. 1에서 살펴보면 최대 출력계수에서의 선단속도비(TSR)가 로터 스피드의 변화에 크게 영향을 받지 않는 MW 풍력터빈과는 달리 로터스피드의 변화에 따라 7.5에서 7.3으로 감소하는 것을 확인할 수 있다.

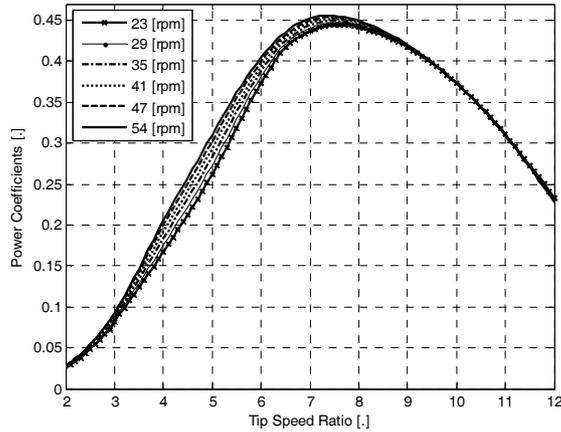


Fig. 1 Power coefficients according to various rotor speed

2.2 정상상태응답

대상 풍력터빈의 Bladed 해석모델을 통해 Fig. 2와 같이 정상상태 응답을 추출하였다. Fig. 2를 살펴보면 정격풍속인 9.6 m/s에서 정격출력인 100 kW에 도달하며, 그 이상의 풍속에서 피치 제어가 시작되는 것을 알 수 있다. 정격풍속에 도달하면 토크 제어기는 정격 토크를 내보내고, 로터 회전속도는 정격에 도달하여 피치 제어에 의해 일정한 속도로 유지된다. 추력의 경우 정격풍속까지 꾸준히 증가하다가 정격풍속 이후 피치 제어에 의해 서서히 감소하는 것을 알 수 있다.

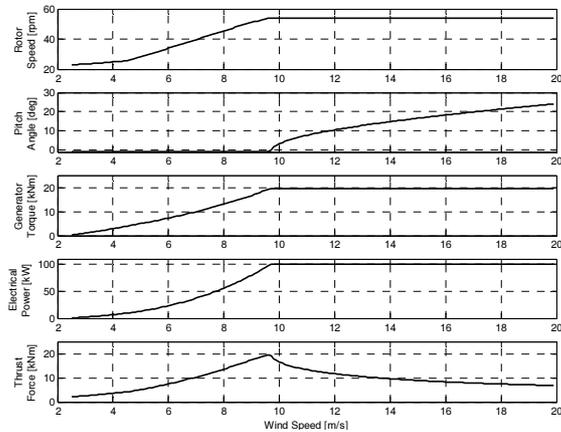


Fig. 2 Steady state response

3. 제어 알고리즘

2.1에서 언급한 것과 같이 회전자 회전면적을 증가시키거나 공력설계를 통한 블레이드 효율 증가를 통한 출력 증가 외에도 풍력 시스템의 신뢰성 향상을 위한 제어기 설계 및 기계적 하중 저감 제어기술을 이용한 경제성 확보도 중요하다. 따라서 MW 풍력터빈에서 일반적으로 사용하는 타워댐퍼 알고리즘을 적용하였다. 정격이하의 풍속영역에서 토크 제어는 로터 회전속도와 반력토크가 1:1로 상응하는 토크 스케줄링 기법을 적용하였다. Fig. 3은 최종적인 제어 구조를 나타내고 있다. 정격이전 영역에서 최대발전효율로 발전하기 위한 토크 스케줄, 정격 이후 영역에서 정격발전량을 유지하기 위한 피치 PI제어, 타워 하중 저감을 위한 타워 댐퍼로 구성되어 있다.

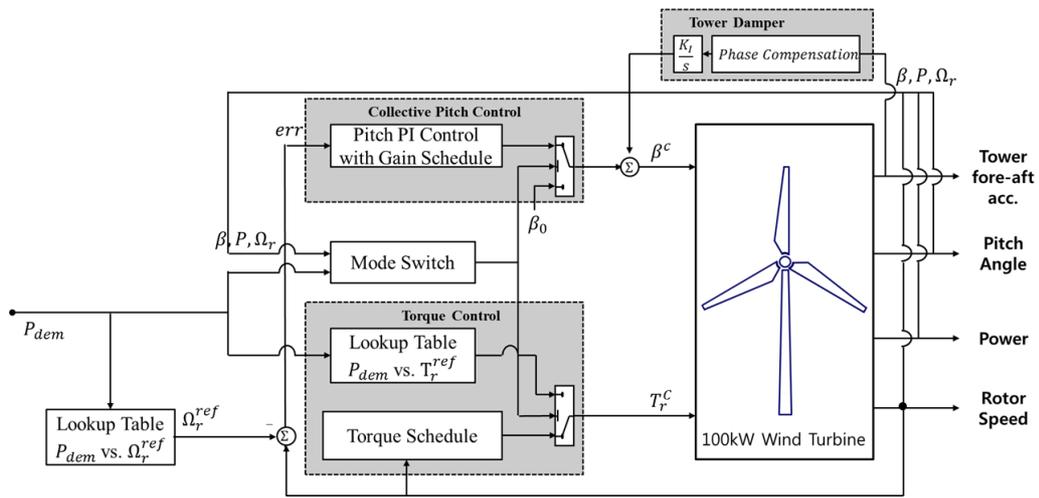


Fig. 3 Control algorithm

3.1 출력 제어

출력 제어는 크게 피치 제어와 토크 제어로 나눌 수 있다. 토크 제어는 정격이하 영역에서 최대 효율로 발전하기 위하여 수행되는데 일반적으로 최대 출력계수를 갖는 선단속도비를 유지시켜야 한다. 하지만 2.1에서 제시된 것과 같이 선단속도비가 풍속에 따라 달라지기 때문에 공력 토크는 아래 식(3)에 제시되는 발전기 반력토크와 평형을 이루도록 변경해야 한다.

$$T_g = T_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \left(\frac{C_{P_{max}}}{\lambda^3} \right) (\Omega_r)^2 = k_{opt} \Omega_g^2 \quad (3)$$

Fig. 4는 기존의 MW 풍력터빈과 마찬가지로 k_{opt} 가 고정됐을 때와 중소형 풍력터빈 블레이드의 특성을 고려하여 식 (3)을 통해 대응한 토크 스케줄을 비교하고 있다. 정격 이후 영역은 정격 로터 회전속도와 측정되는 로터 회전속도의 오차를 제어인자로 하여 PI제어를 수행하였다. 피치 제어 루프의 교차주파수는 난류바람의 파워스펙트럼밀도(PSD, Power

Spectral Density)와 피치 액츄에이터의 성능을 고려하여 1 rad/s로 하였으며, 균일한 피치 각 제어 민감도를 맞추기 위하여 게인 스케줄링을 적용하였다⁴⁾.

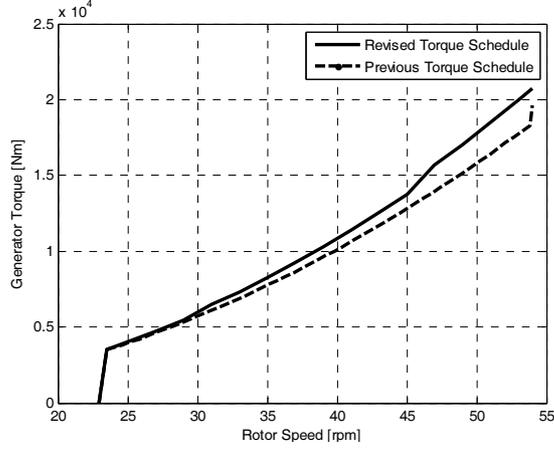


Fig. 4 Comparison of torque schedule

3.2 타워 댐퍼

타워의 전후방향 운동에 대한 감쇠비를 증대시키는 목적으로 사용되며 타워의 전후방향 DEL을 줄일 수 있는 제어기 법이다. 타워의 운동은 아래 식으로 간략화할 수 있다.

$$m_t \ddot{x}_{faft} + c_t \dot{x}_{faft} + k_t x_{faft} = F_T + \delta u \tag{4}$$

여기서 $\delta u = -c_a \dot{x}_{faft} = -c_a \int \ddot{x}_{faft}(\tau) d\tau$ 의 피드백을 사용하면, 타워의 댐핑을 $c_a + c_t$ 로 증가시킬 수 있다. 또한 피치 각이 변화하면 풍력터빈 구조물에 작용하는 추력도 변화되므로 $\delta u = \left(\frac{\partial F_T}{\partial \beta}\right)_0 \delta \beta$ 의 관계가 가능하기 때문에 $\delta u = -c_a \dot{x}_{faft}$ 만큼의 추력을 발생시키려면 아래 식처럼 피치 각을 조절하면 된다⁵⁾.

$$\delta \beta = -\frac{c_a}{(\delta F_T / \delta \beta)_0} \int \ddot{x}_{faft}(\tau) d\tau \tag{5}$$

여기서 $-\frac{c_a}{(\delta u / \delta \beta)_0}$ 은 타워댐퍼의 게인과 동등한 것으로 알려져 있다⁵⁾.

Fig. 5는 12 m/s 풍속을 기준으로 타워댐퍼 게인 적용 유/무에 따른 풍속 입력에 대한 나셀의 전후방향 운동 속도 크기의 주파수 응답을 보여주고 있다. 타워 1차 모드인 6.7 rad/s 부근에서 공진 운동의 크기가 매우 큰 것을 알 수 있다. 이를

저감시키기 위하여 타워댐퍼 계안을 적용하면 11 dB 정도 저감시킬 수 있다.

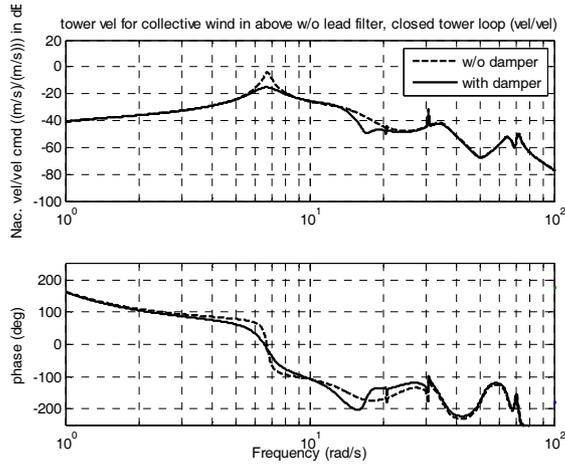


Fig. 5 Frequency response of tower loop

4. 연구 결과

본 연구에서는 레이놀즈수를 고려하여 정격이하 영역의 토크 스케줄을 개선했을 때 발전량 비교 결과와 타워댐퍼 적용 유/무에 따른 평균발전량, 발전량 표준편차, 타워 뿌리 부분 좌우, 전후 방향 DEL의 크기를 성능지표로 설정하고 비교하였다. 아래에 제시된 Fig. 6은 평균풍속 5 m/s, NTM(Normal Turbulence Model) 바람조건으로 토크 스케줄 변화에 따른 발전량을 시계열로 나타내고 있다. 개선된 토크 스케줄 적용 시 발전량이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

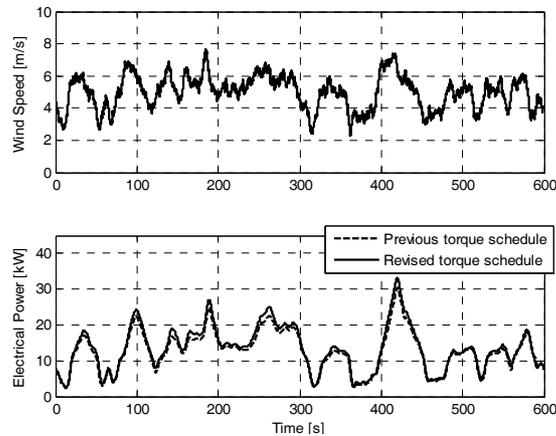


Fig. 6 Simulation results at 5 m/s

Table 2는 동일한 5 m/s, NTM모델의 시드(seed)를 바꾸어 평균발전량을 비교한 결과를 나타내고 있다. 토크 스케줄을 개선한 결과 7%의 출력이 향상되는 것을 확인할 수 있다.

Table 2 Specification of Target Wind Turbine

Seed	Previous torque schedule	Revised torque schedule	error (%)
1	13.4 kW	14.4 kW	7.1
2	12.7 kW	13.6 kW	7.3
3	13.3 kW	14.1 kW	6.6

아래 Fig. 7은 평균풍속 10 m/s에 동적 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 정격풍속 이상에서 정격 로터 회전속도를 유지시키기 위해 피치 각이 사용되며 정격을 유지하는 것을 알 수 있다.

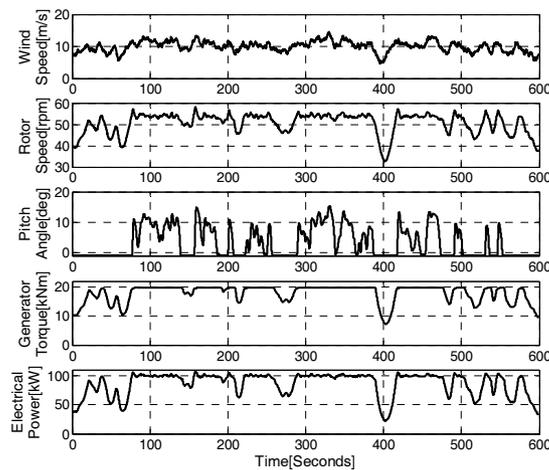


Fig. 7 Simulation results (10 m/s, NTM, 600 s)

Fig. 8, 9는 평균풍속 10~20 m/s의 NTM 바람 조건에서 600초 시뮬레이션 결과를 각각 막대그래프로 표현하고 있다. 평균발전량은 0.5% 미만의 오차를 보이고 있고, 발전량의 표준편차는 최대 6.2%의 오차를 나타내는 것을 알 수 있다. 타워 하중 저감을 위한 타워댐퍼의 추가적인 피치운동이 출력에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

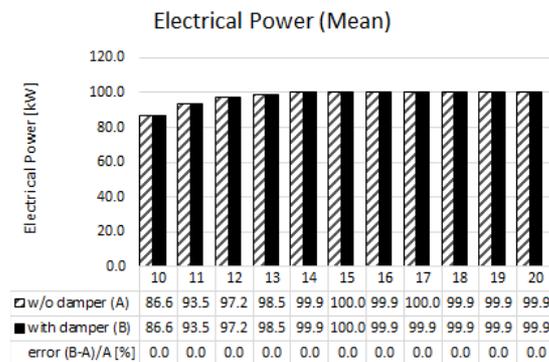


Fig. 8 Mean power according to mean wind speed

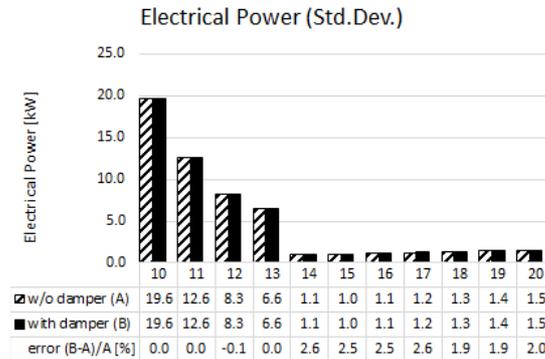


Fig. 9 Standard deviation of power according to mean wind speed

Fig. 10, 11은 각각 타워 뿌리 부분의 좌우, 전후방향 평균 굽힘모멘트를 나타내고 있다. 타워댐퍼 적용 유무는 평균 굽힘모멘트에 영향을 미치지 않을 것을 알 수 있으며, 타워 전후 방향의 굽힘모멘트가 좌우 방향에 비해 매우 큰 것을 확인할 수 있다.

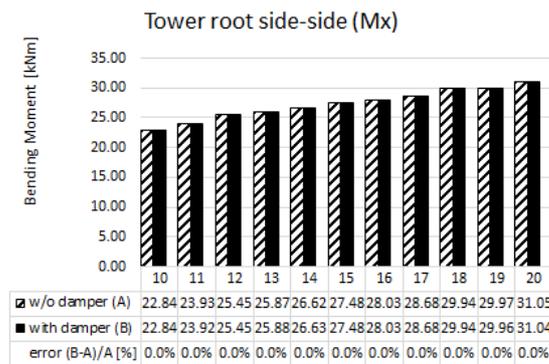


Fig. 10 Mean of tower side-side bending moment

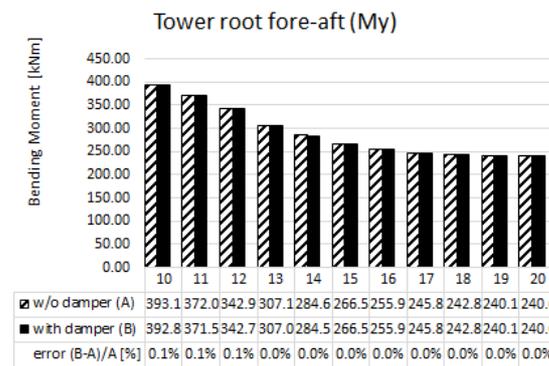


Fig. 11 Mean of tower fore-aft bending moment

Fig. 12, 13은 각각 타워 뿌리 부분의 좌우, 전후방향 DEL을 나타내고 있다. 평균풍속이 증가함에 따라 DEL이 꾸준히

증가하는 것을 확인할 수 있다. 타워 DEL의 증가는 추력뿐만 아니라 타워에 작용하는 로터 회전속도의 1P, 3P, 6P, 9P... 주파수 성분과 드라이브트레인의 모드, 타워 1차 모드의 공진크기에 의해 결정되기 때문이다. 타워댐퍼 적용 후의 결과는 타워의 좌우 방향의 경우 최대 3.4%의 오차를 보이고 있으며, 전후 방향의 경우 20 m/s의 풍속조건에서 최대 32%의 저감률을 보이는 것을 확인하였다.

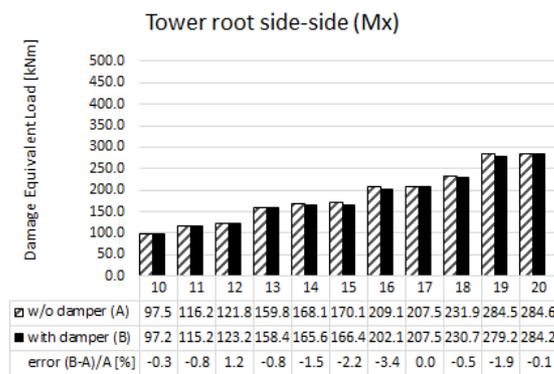


Fig. 12 DEL of tower side-side moment according to mean wind speed

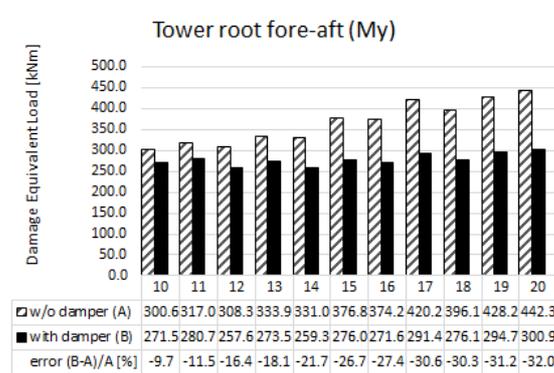


Fig. 13 DEL of tower fore-aft moment according to mean wind speed

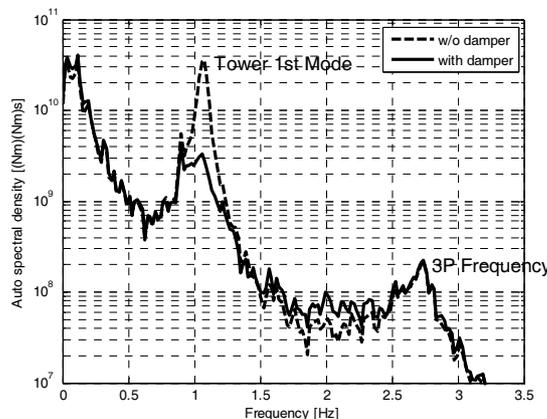


Fig. 14 Power spectral density of tower fore-aft moment

Fig. 14는 타워 전후방향 뿌리 부분 하중의 파워스펙트럼밀도(PSD, Power Spectral Density)를 나타내고 있다. 타워 댐퍼 적용 후 1.19 Hz의 타워의 1차 모드가 현저히 저감되는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 100 kW 중형 풍력터빈의 출력 및 하중저감 제어 알고리즘을 설계하였다. 대형풍력터빈에 비해 중형 풍력터빈은 작동영역에서의 레이놀즈수가 작은 특징이 있다. 따라서 레이놀즈수 변화에 의한 공력성능을 고려하여 토크 스케줄을 개선하였고 MPPT제어를 통해 정격이하 영역에서 대략 7%의 출력 증가를 확인하였다. 또한, 중형 풍력터빈에 타워댐퍼 알고리즘을 적용하여 타워 전후방향 DEL을 최대 32% 저감하였다.

향후 제어 알고리즘을 수정 보완하여 제어기의 성능을 실제 대상 풍력터빈 PLC(Programmable Logic Controller)에 적용하여 실증하기 위한 연구가 수행될 예정이다.

후기

본 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(NO.20153030023610). 또한 이 논문은 2016년도 강원대학교 대학회계의 지원을 받아 수행한 연구입니다.

REFERENCES

1. Bottasso, C. L., Campagnolo, F., Croce, A., and Maffenini, L., Development of a Wind Tunnel Model for Supporting Research on Aero-Servo-Elasticity and Control of Wind Turbines, Diss. Politecnico di Milano, pp. 1-8, 2011.
2. Hansen, C., and Codes, N. D. NWTC Design, AirfoilPrep, NWTC Design Codes, Available: <http://wind.nrel.gov/designcodes/preprocessors/airfoilprep/>Last modified, 2010.
3. DRELA, Mark. XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils. In: Low Reynolds Number Aerodynamics, Springer Berlin Heidelberg, pp. 1-12, 1989.
4. Nam, Y., and Im, C. H., Control System Design of NREL 5 MW Wind Turbine. Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 32, No. 5, pp. 31-40, 2012.
5. Bossanyi, E. A., The Design of Closed Loop Controllers for Wind Turbines, Wind Energy, Vol. 3, No. 3, pp. 149-163, 2000.