

NREL 5MW 풍력터빈의 제어시스템 설계

남윤수*, 임창희**

*강원대학교 기계메카트로닉스공학과(nys@kangwon.ac.r),
**강원대학교 대학원 기계메카트로닉스공학과(ich_me@kangwon.ac.kr)

Control System Design of NREL 5MW Wind Turbine

Yoonsu Nam* Changhee Im**

*Dept. of Mechanical and Mechatronics, Kangwon National University(nys@kangwon.ac.r),
**Dept. of Mechanical and Mechatronics, Graduate School, Kangwon National
University(ich_me@kangwon.ac.kr)

Abstract

This paper introduces a methodology for NREL 5MW wind turbine, which is the variable speed and variable pitch (VSPV) control system. This control strategy maximizes the power extraction capability from the wind in the low wind speed region and regulates the wind turbine power as the rated one for the high wind speed region. Also, pitch control efficiency is raised by using pitch scheduling. Torque schedule is made of torque table depending on the rotor speed. Torque control is used for vertical region in a torque-rotor speed chart. In addition to these, mechanical loads reduction using a drive train damper and exclusion zone on a torque schedule is tried. The NREL 5MW wind turbine control strategy is comprised by the generator torque and blade pitch control. Finally, proposed control system is verified through GH Bladed simulation.

Keywords : Wind Turbine(풍력터빈), Torque control(토크 제어), Exclusion zone(공진회피 구간), Tower loads(타워 하중), Pitch control(피치 제어), Load reduction(하중저감), Drive train damper(동력전달축 감쇠기)

기 호 설 명

K_S	: 회전축의 탄성계수	σ_u	: 풍속의 표준편차
N	: 회전축계의 증속비	L_u	: $280z/(1000\alpha^{0.15})^{0.35}$
J_R	: 로터의 관성질량	z	: 고도
J_G	: 발전기의 관성질량	α	: 조도(roughness length)
\bar{u}	: 풍력발전기 방향 평균 풍속	ω	: 주파수(rad/s)

submit date : 2012. 7. 2, judgment date : 2012. 7. 12, publication decide date : 2012. 10. 23
communication author : Im, Chang-Hee(ich_me@kangwon.ac.kr)

- $\Phi_{uu}(\omega)$: 파워 스펙트럼 밀도(power spectral density)
- ζ : 감쇠비(damping ratio)
- ω_n : 동력전달 축진동 고유진동수 (rad/s)
- τ : 시정수
- ω_s : 구조 모드 주파수(rad/s)
- ω_1, ω_2 : 노치필터의 특성주파수
- $k_g(\beta)$: 피치각 $\beta(r)$ 에 따른 계인 스케줄링 인자
- k_p : 피치루프 비례제어 계인
- k_i : 피치루프 적분제어 계인

1. 서 론

풍력 터빈(WT, wind turbine)은 바람 에너지를 전기 에너지로 변환하는 기계 시스템이다. 풍력 터빈은 바람이 갖고 있는 에너지를 전기로 변화시키기 때문에 풍황 자원이 좋은 장소에 설치될 수밖에 없고, 많은 양의 전기 에너지를 얻기 위해 풍력 터빈의 크기도 점점 대형화되어지고 있다. 설치 장소 또한 육지에서 해상으로 옮겨가는 추세이다. 그에 따라 풍력 터빈의 효율과 성능을 결정하는 중요한 요소인 풍력 터빈의 제어 전략과 제어 시스템에 대한 중요성이 높아지고 있다. 또한, 한번 설치되면 최소한 20년 이상 정상운전되어야 하는 풍력 터빈에서 두 가지 중요한 설계 관점은 바람 에너지 회수 효율과 구조물의 안전 작동이다. 풍력 터빈의 에너지 회수는 어떻게 극대화시키고 기계적 하중은 어떻게 최소화 하느냐가 가장 큰 관점이다. 바람 에너지를

효과적으로 회수할 수 있는 제어기법과 바람에 의한 기계적 하중의 증첩으로 피로파괴에 이르지 않도록 기계적 하중을 완화시킬 수 있는 제어기법의 개발은 대형 풍력 터빈의 제품 경쟁성과 직결된 문제이다.

풍력터빈 제어 시스템 설계방법이나 검증에 대한 연구는 Vestas, GE, Siemens 등의 풍력터빈 완성업체나 풍력관련 세계적 유수 연구소인 ECN (Energy research Center of the Netherlands)이나^{2,3)} NREL(National Renewable Energy Laboratory)^{4,5)}, GL GH(Garrad Hassan)^{6,7)} 등이 주류를 이루고 있다. 풍력터빈 완성업체는 자사의 설계 노하우 보호를 위하여, 풍력터빈 제어관련 연구 성과의 발표를 제한하고 있다. 풍력터빈 제어시스템의 설계를 제대로 검증하려면, 풍력터빈에 대한 물리적 외형뿐 아니라 공기역학 데이터, 각 부품의 기계적 물성치 등에 대한 데이터들이 완전하게 알아야 한다. 예를 들자면, 회전 블레이드는 공기역학적 특성이 서로 다른 10개 내외의 익형 구조물을 연속으로 결합하여 제작하는데, 각 익형의 양력계수, 항력계수, 피칭 모멘트 계수에 대한 데이터뿐 아니라 익형 구조물의 구조적 외형 데이터와 물성치들이 모두 정의가 되어야 한다. 그러나, 위와 같은 풍력터빈 데이터는 모든 제작업체가 보안상의 이유로 공개하지 않고 있다. 또한, 이러한 데이터들을 확보하였다 하더라도, 공기역학적 현상과 구조적인 탄성진동 문제가 복잡하게 뒤섞인 풍력터빈 탄성 동역학을 계산할 수 있는 소프트웨어가 필요하다. 따라서, 본 논문은 NREL 산하 NWTC(National Wind Turbine Center)의 연구진들이 연구용 풍력 터빈으로 개발하여, 그 제원을 공표한 NREL 5MW WT¹⁾을 대상으로 연구를 하였으며, 설계된 피치 제어 시스템, 토크 제어 시스템 그리고 기계적 하중 저감 알고리즘인 동력전달축 감쇠기(drive train damper)와 공진회피 구간(exclusion zone) 설계등을 검증하기 위하여 풍력터빈 전용 설

Table. 1 NREL 5MW WT data¹⁾

Rotor diameter	126 m
Hub height	90 m
Gearbox ratio	97
Rated rotational speed	12.1 rpm
Cut in/ cut-out wind speed	4 m/s, 25 m/s
Rated wind speed	11.3 m/s

계/검증 소프트웨어인 GH Bladed를 사용하였다⁸⁾. Table.1은 NREL 5MW WT에 대한 기본적인 특성값들을 정리한 것이다.

본 논문은 NREL 5MW WT을 대상으로 토크제어, 피치 제어시스템을 설계하는 절차와 함께 구조물 하중 저감을 위한 제어기에 대하여 논의한다.

2. NREL 5MW 풍력 터빈의 제어시스템

풍력 터빈 제어시스템 설계에 있어서, 제 1의 목적은 끊임없이 변하는 바람에 대하여 Fig. 1에 규정된 파워커브 형상대로 출력 파워를 생산하는 것이다. Fig. 1의 'Region I' 구간은 Max Cp 구간으로 Cp 값을 최대화하여 파워를 생산하는 구간이다. 여기서, Cp는 풍력 터빈의 파워계수(power coefficient)로서 풍력터빈의 바람 에너지의 회수효율을 의미한다. 'Region III' 구간은 정격풍속 이상의 영역에 대하여, 피치각을 조절하여 Cp 값을 낮춰 풍속이 증가하여도 풍력터빈이 정격파워를 내도록 하는 구간이다. 'Region II' 영역은 'Region I'과 'Region III' 사이의 천이영역으로 두 구간사이의 전환을 부드럽게 진행하기 위하여, 또는 블레이드 소음을 제한하기 위하여 설정된다⁹⁾. 'Region I'과 'Region II' 구간에서 피치는 일정한 각으로 유지되며, 발전기 토크 제어를 통하여 Fig. 1의 파워커브를 추종하는 제어가 수행된다. 한편, 'Region III'에서는 발전기 토크는 일정한 값으로 유지하면서

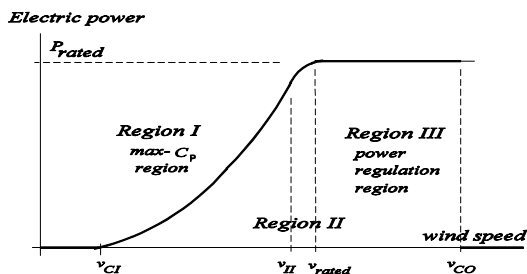


Fig. 1 Power curve of a wind turbine

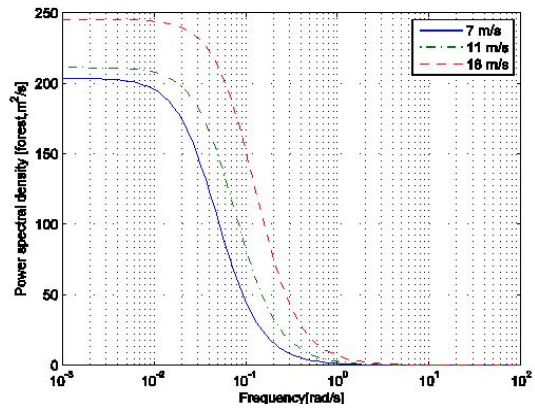


Fig. 2 PSD of turbulence (class II-A, forest)

피치 제어를 사용하여, 풍력터빈의 출력파워를 정격으로 제어한다. 풍력터빈의 토크 제어와 피치제어 시스템의 설계 요구조건은 결국 바람의 특성에 따라 결정된다. 즉, 바람이 갖고 있는 주파수 성분보다 이들 제어 시스템의 대역폭(bandwidth)이 크도록 설계해야 바람이 갖는 에너지를 풍력터빈이 회수할 수 있기 때문이다⁹⁾. 수초에서 수분 단위로 변하는 바람을 난류(turbulence)라 부르는데, 풍력 터빈은 이 난류가 갖고 있는 운동 에너지를 적절하게 회수하여야 한다. 난류의 특성은 아래의 Von Karman 스펙트럼(spectrum)으로 기술할 수 있다.¹⁰⁾

$$\Phi_{uu}(\omega) = \frac{4\sigma_u^2 L_u / \bar{u}}{(1 + 70.8(\omega L_u / (2\pi\bar{u}))^2)^{5/6}} \quad (1)$$

위 식은 풍력터빈으로 불어오는 수평성분 바람의 파워밀도함수(power spectral density, PSD)를 나타내는데, 주파수 대역에서 바람 에너지 분포를 나타낸다. Fig. 2는 IEC 61400-1¹¹⁾ 규정에 해당하는 class II-A 풍력터빈에 대하여, 평균 풍속 7, 11, 18 m/s의 난류 성분의 PSD를 나타낸 것이다. Fig. 2에 나타나 있듯이, 1 rad/s의 주파수범위 내에 대부분 바람 에너지가 분포되어 있는 것을 확

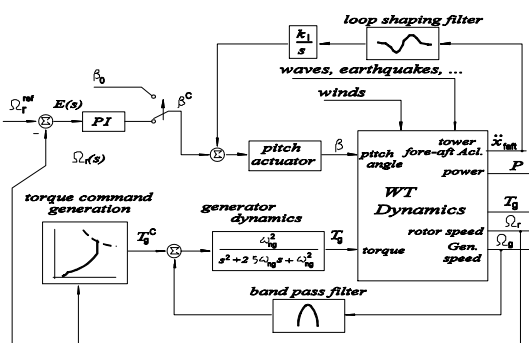


Fig. 3 Control system structure of NREL 5MW WT

인할 수 있다. 따라서 풍력 터빈 제어시스템의 주파수 대역폭(bandwidth)을 1 rad/s 정도로 설계하면 바람이 가지고 있는 대부분의 에너지를 회수할 수 있다.⁹⁾ 위에서 설명되는 토크 제어나 피치 제어 시스템은 위의 요구조건을 만족하도록 설계되었다.

Fig. 3은 본 논문에서 다루게 될 NREL 5MW WT의 제어구조이다. 단, 이 그림의 상단부는 타워의 진동을 저감시키기 위한 타워 댐퍼루프인데, 본 논문에서는 이 부분을 다루지 않았다. 이 그림으로부터 풍력터빈을 제어하는 2개의 인자, 피치각 β 과 발전기 토크 T_g 를 확인할 수 있다. 따라서 2개의 제어 루프가 필요한데, 하나는 피치제어루프, 다른 하나는 다음 절에서 다루는 토크 제어루프이다.

2.1 토크 제어 루프 설계

Fig. 3에서 볼 수 있듯이 토크제어는 기본적으로 룩업 테이블 방식으로 수행된다. Fig. 4에 NREL 5MW WT의 토크 스케줄을 다시 도시하였다. 로터 회전속도가 정격에 이르기 전까지는 발전기 토크와 회전속도의 관계가 1 대 1의 관계에 있으므로 토크제어상의 문제는 없다. 그러나, 회전속도가 정격이 되면, 즉 12.1 rad/s가 되면, 더 이상 1 대 1의 관계는 성립하지 않는 수직구간이 된다. 이 구간에서는 PI-제어기 사용하여 이러한 난점을 해결할 수 있다⁶⁾. Fig. 5의 좌측 2개 선도는 PI-제어기가

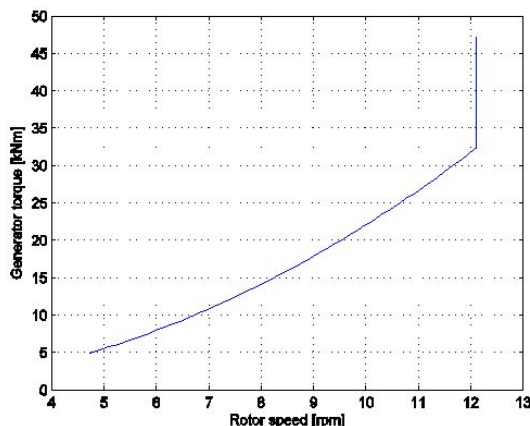


Fig. 4 NREL 5MW torque schedule

적용된 토크 루프게인 전달함수의 주파수 응답이다. 위의 것이 루프게인의 크기, 아래의 것은 위상 선도이다. 앞서도 언급되었지만, 바람 에너지의 적절한 회수를 위하여 1 rad/s 근처에서 대역폭을 갖도록 설계되었다는 것을 Fig. 5로부터 확인할 수 있다. 따라서 설계된 토크 루프는 에너지 회수관점에서 적절하다고 판단되지만, 10 rad/s와 19 rad/s에서 루프게인의 크기가 크게 튀고 있는 것을 볼 수 있다. 10 rad/s에서의 피크는 동력 전달축에서 발생하는 축진동 모드에 의한 공진을 나타내며, 19 rad/s에서의 피크는 회전 블레이드가 평균 회전궤적을 중심으로 진동하는 모드, 즉 블레이드 회전 평면내 진동모드에 의한 공진현상이다. 10 rad/s와 19 rad/s에서의 공진을 적절히 줄여 주지 않는다면, 풍력터빈의 동력 전달축과 블레이드는 지속적인 피로하중을 받게 되어, 그 수명에 나쁜 영향을 주게 된다. 다음 절에서는 각각의 모달 주파수에서의 댐핑을 증가시켜, 공진현상을 억제하는 제어시스템에 대하여 논의한다.

2.1.1 동력 전달축 진동제어

위에서 언급하였던 축진동 모드는 풍력터빈 회전축 양끝단에 위치한 두 개의 등가 관성 질량과 회전축의 비틀림 탄성에 의한 회

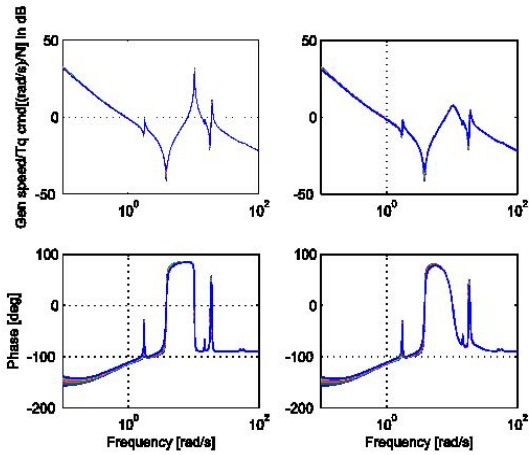


Fig. 5 Frequency response of a torque control loop

전축계의 진동모드이다. 즉, 동력 전달축 앞 단에는 3개 블레이드에 의한 회전관성, 뒷단에는 발전기 로터 회전관성이 존재하고, 이 2개의 등가질량은 동력 전달축의 비틀림 탄성에 의하여 아래 식으로 주어지는 축진동 모드 주파수 ω_n 를 가지게 된다.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_s N^2 J_R J_G}{J_R + J_G N^2}} \quad (2)$$

NREL 5MW WT에 대한 특성값들을 위식에 대입하면 ω_n 값을 구할 수가 있는데, 대략 10 rad/s 근처의 값을 가지게 된다. 블레이드 회전 평면내 진동모드는 식 (2)처럼 간략한 수식으로 표현할 수 없으며, GH Bladed와 같은 풍력터빈 전용 소프트웨어를 사용하여 모드 해석을 수행하여 그 특성 주파수를 구할 수 있다.

두 진동모드에서의 댐핑을 증가시키는 방법으로 아래 식의 대역통과필터(bandpass filter, BPF) $G_{BP}(s)$ 를 사용하였다.

$$G_{BP}(s) = \frac{2\zeta s(s/\omega_s)(\tau s + 1)}{(s/\omega_s)^2 + 2\zeta(s/\omega_s) + 1} \quad (3)$$

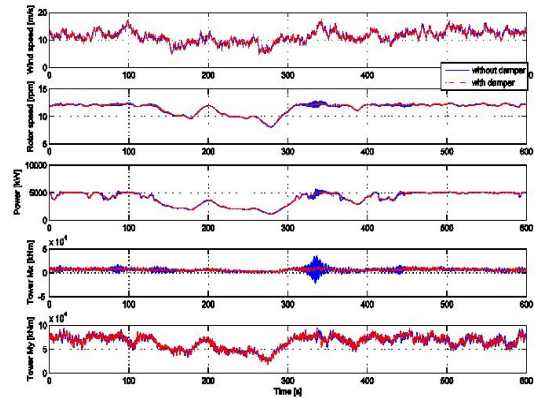


Fig. 6 Time domain simulation results for on/off of drive train damper for 11 m/s turbulent wind

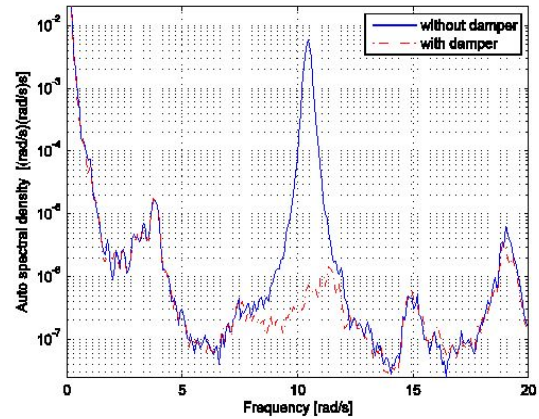


Fig. 7 Power spectral density of gearbox torque for on/off of drive train damper for 11 m/s turbulent wind

위 BPF 필터를 사용하는 축진동 댐퍼의 작동원리는 단순하다. 발전기 회전속도 신호로부터, BPF를 사용하여 위의 2개 주파수 성분 신호를 추출하여, 위상을 반전시킨 후 적절한 신호 증폭을 하여 발전기 토크 제어를 수행하게 되면, 위의 2개 모드의 댐핑을 증가시킬 수 있다. Fig. 5의 우측 2개 주파수 응답은 2개의 BPF를 적용한 결과이다. 이 그림의 좌측과 비교할 때, 10 rad/s와 19 rad/s 주파수에서의 피크가 크게 줄고 있는데, 이로부터 2개의 진동모드에 대한 댐핑이 식 (3)과 같은 BPF의 적용으로 크게 증가한 것을 확인할 수

있다.

Fig. 6과 7은 식 (3)의 BPF를 적용한 후, GH Bladed를 사용하여 시뮬레이션한 결과이다. Fig. 6은 시간영역에서의 시뮬레이션 결과를 도시한 것이고, Fig. 7은 기어박스 회전속도의 파워 스펙트럼 밀도(PSD)이다. Fig. 6의 시간영역 시뮬레이션 결과로는 댐퍼 사용 효과를 확실히 구분하기 힘들지만, Fig. 7의 PSD를 살펴보면 확연히 약 10 rad/s의 동력 전달축 진동모드의 주파수 영역에서 피크가 상당히 줄어든 것을 확인할 수 있다. 또한 19 rad/s 영역대의 블레이드 회전 평면내 진동모드 역시 감소하는 것을 확인할 수 있다.

2.1.2 공진 회피 구간(exclusion zone)

여기서 자세히 설명할 수는 없지만, 타워 구조물은 회전속도의 3배 주파수 성분으로 가진된다¹⁰. 즉, 블레이드의 회전속도를 1p(per revolution)로 표현할 때, 타워는 3p, 6p, 9p, ...의 주파수 성분으로 가진(excitation)된다. 따라서 이 가진 주파수와 타워의 전후방향 운동모드의 주파수가 일치하면 타워의 공진이 발생한다. NREL 5MW WT의 경우, 로터 회전속도 작동범위 안에 있는 5.6 rpm에서 위에서 언급한 공진현상이 발생한다. 즉, 5.6 rpm의 3배 주파수인 0.28 Hz가 바로 타워의 전후방향 운동의

모드 주파수와 일치하기 때문이다. 이러한 현상이 발생하는 것을 방지하기 위하여, Fig. 8 처럼 공진 회피 구간을 설정하게 된다⁶. 즉, 토크 스케줄을 조절하여 로터의 회전속도가 5.6 rpm 근처에서 작동되는 것을 방지하는 것이다. 적용된 공진 회피 구간은 5.6 rpm에서 ± 0.8 rpm 영역이다. 5.6 rpm 중심으로 로터 회전속도 영역을 2 구역으로 나눠 풍력 터빈의 로터 회전속도가 5.6 rpm 구간에서 작동하지 않게 토크스케줄을 설계하였다. 이를 위하여 2.1절에서 설계한 토크 PI-제어기가 다시 적용된다. Fig. 8의 2개 수직 구간사이의 전환은 풍속에 의하여 자연스럽게 진행되며, 비교적 빠르게 그 전환이 이루어져 공진현상의 발생을 회피할 수 있게 된다.

Fig. 9는 GH Bladed를 사용한 시뮬레이션 결과이다. 300~400초 사이 구간에서 타워 루트(root) 부에서의 좌우방향 굽힘 모멘트 M_x , 전후방향 굽힘모멘트 M_y 성분을 확인해보면, 하중의 최대치가 공진 회피 구간 제어기법을 사용함으로써 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 특성을 더 잘 나타내기 위하여, 시뮬레이션 결과의 300~350초 구간을 확대하여 다시 그린 것이 Fig. 10이다. 이 그림에서 320~330초 구간을 살펴보면 타워의 하중 성분이 상당히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 공진

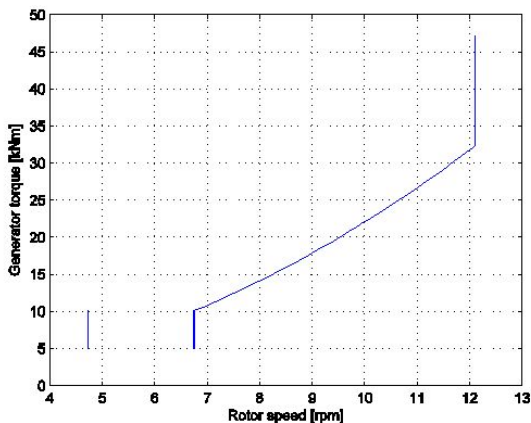


Fig. 8 Exclusion Zone

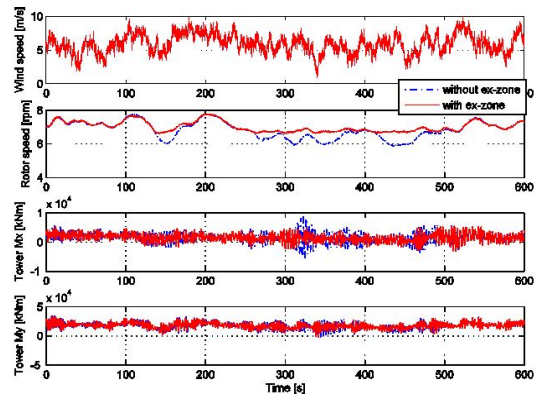


Fig. 9 Simulation results of using exclusion zone for 5.6 m/s turbulent wind

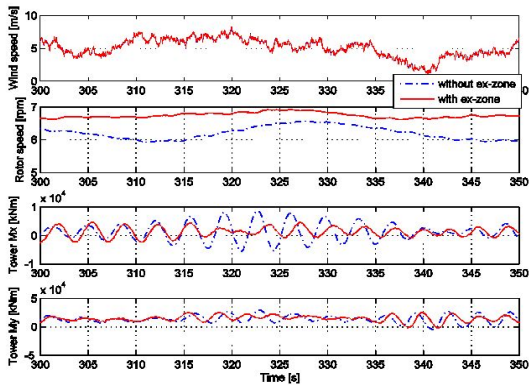


Fig. 10 Effect of an exclusion zone

회피 구간 제어기법을 사용하지 않는 경우, 로터 회전속도가 5.6 rpm 근처에서 회전하게 되면서, 타워의 전후방향 1차 모드를 가진 시키게 되어 타워의 하중값이 크게 상승되는 것을 확인할 수 있다. 반면에 공진 회피 구간 제어기법을 사용함으로써, 로터 회전속도는 5.6 rpm이 아닌 6.6 rpm 근처에서 작동하게 되고, 그 결과 타워의 Mx, My 성분이 감소하게 된다.

2.2 피치 제어 루프 설계

피치제어루프는 Fig. 3의 위쪽에 있는 루프이다. 피치제어는 정격이상의 풍속영역에서만 작동하고, 정격이하의 영역에서는 max-Cp 운전을 위하여 0° 근처의 피치각으로 유지된다. 한편, 정격이상의 풍속영역에서 발전기 토크는 정격으로 유지되어야 한다. Fig. 3의 피치루프 구조에 자세히 그려져 있지 않지만, 피치제어 루프도 2.1절에서 논의된 축진동 모드와 블레이드의 평면내 진동모드에 대한 적절한 보상이 필요하다. 아울러 로터 회전의 3p 성분도 필터링하여야 한다. 이 절에서는 위 문제를 해결하는 노치필터(notch filter) 설계와 이의 적용 결과의 효용성을 GH Bladed 시뮬레이션을 활용하여 검증한다. 피치루프 설계의 또 다른 중요 포인트는 풍속에 따라 변화되는 피치 민감도(pitch effectiveness)에

의한 영향을 최소화하는 게인 스케줄링(gain scheduling) 문제이다.

2.2.1 게인 스케줄링(gain scheduling)

2 장 도입부에서 피치제어루프의 설계 요구조건에 대하여 논의하였다. 즉, 효율적인 바람에너지 회수를 위하여 피치제어 시스템의 대역폭을 1 rad/s 정도로 설정해야 한다. 이를 위하여 아래 구조의 피치 PI-제어기 $k(s)$ 가 설계되었다.

$$k(s) = k_g(\beta) \frac{k_p}{s} \left(s + \frac{k_i}{k_p} \right) \quad (4)$$

단일 구조의 PI-제어기로는 풍속에 따른 피치 민감도 문제를 해결할 수 없기 때문에 풍속에 따라 피치 제어기의 전체 게인의 크기를 조절해 주는 게인 스케줄링이 요구된다. 이를 조금 더 세부적으로 설명하면 아래와 같다. 고풍속 영역에서의 피치각을 1° 움직였을 때 로터 회전속도가 받는 영향은 저풍속 영역보다 훨씬 크게 된다¹¹⁾. 따라서 정격 부근의 저풍속 영역에서 식 (4)의 전체 게인은 고풍속 영역에서의 게인보다는 훨씬 크게 설계되어야 한다. NREL 5MW WT의 경우, 25 m/s에서의

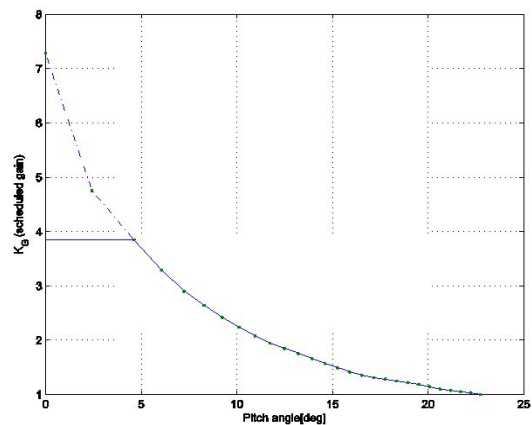


Fig. 11 Pitch gain schedule

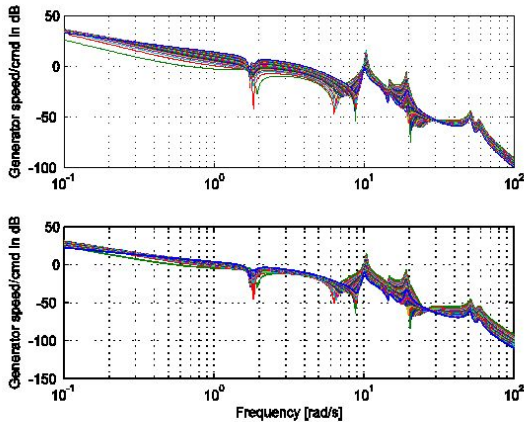


Fig. 12 Frequency response of a pitch control loop

피치게인을 1로 할 때 풍속에 따라 피치게인의 상대적 크기가 어떻게 변화되어야 하는 가를 보인 것이 Fig. 11이다. 앞서 논의한 바와 같이 정격 풍속 근처에서 게인의 크기가 상대적으로 큰 것을 확인할 수 있다. 그러나, 정격영역 근처에 피치 게인의 크기를 너무 크게 하면, 풍력터빈 구조물에 심한 스트레싱(stressing)을 가하게 된다¹²⁾. 따라서, Fig. 11처럼 정격 풍속 근처에서 피치게인의 크기를 3.8의 값으로 제한하였다. 게인 스케줄링은 Fig. 11처럼 풍속에 따라 게인값을 조절해 주는 것이 이상적이지만, 사실상 바람을 정확히 측정하는 것이 어렵기 때문에 피치각의 함수로 게인 스케줄링하게 된다. 식 (4)에서 $k_p(\beta)$ 는 피치각 β 의 함수로 게인이 스케줄링되었다는 것을 의미한다.

Fig. 12에 2개의 주파수 응답이 그려져 있다. 위쪽의 것은 게인 스케줄링을 적용하지 않은 경우의 피치제어 루프게인의 주파수 응답 크기선도이고, 아래쪽 것은 게인 스케줄링을 사용한 경우에 대한 결과이다. 이 그림에는 여러 개의 주파수 응답들이 겹쳐 그려져 있다. 각각의 주파수 응답은 정격풍속부터 차단풍속(cut-out wind speed)까지 1 m/s의 간격으로 나눈 각각의 풍속 조건에서 의 피치 루프게인의 주파수 응답을 뜻한다. 이 그림에서

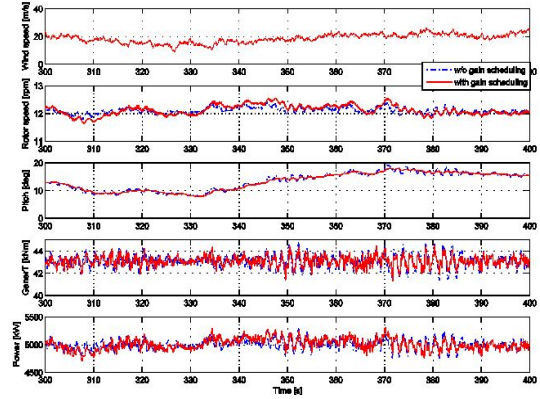


Fig. 13 Simulation results of using gain scheduling for 18 m/s turbulent wind

알 수 있듯이 1 rad/s 근처에서 넓게 퍼져있던 크로스오버 주파수(crossover frequency)들이 1 rad/s에 모이게 되는 것을 확인할 수 있다. 다시 말하여, 풍력터빈의 피치제어의 민감도 특성이 크게 둔화되었는데, 이로 인하여 전체 풍속범위에 대하여 풍력터빈의 응답이 균일한 특성으로 변화된다는 것을 의미한다.

Fig. 13은 게인 스케줄링 기법을 적용한 경우와 이를 적용하지 않은 경우에 대하여, 풍력터빈의 응답을 보여주는 GH Bladed 시뮬레이션 결과이다. 이미 예상되었듯이 단일 PI-제어기를 사용하는 것보다 게인 스케줄링 기법을 사용하면 피치응답이 부드럽게 개선되는 것을 310초에서 330초 시뮬레이션 구간에서 확인할 수 있다. 따라서 피치 변화폭이 적어 풍력터빈의 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있다.

2.2.2 피치 제어 루프 필터설계

Fig. 12의 피치 루프게인 주파수응답을 보면, 축진동 모드와 블레이드의 평면내 진동모드가 피치루프에도 영향을 미치고 있는 것을 볼 수 있다. 40 rad/s 정도의 대역폭을 갖는 발전기 토크제어 특성과 비교할 때, 피치 액추에이터의 대역폭은 10 rad/s 정도로 매우 느리다. 따라서 2.1.1절에서 논의된 식 (3)의

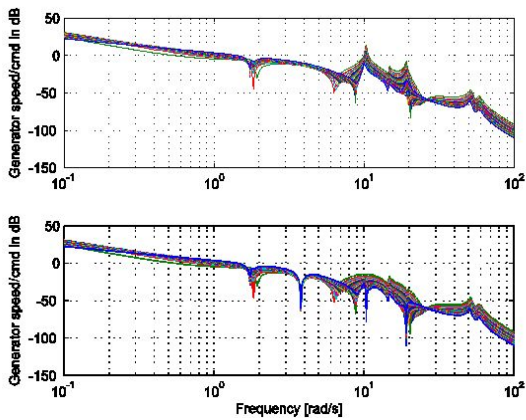


Fig. 14 Frequency responses of a pitch control loop with notch filters

BPF를 사용하는 방법은 피치 제어루프에는 적용이 불가능하다. 아래 식으로 주어지는 노치 필터(notch filter) $G_n(s)$ 를 사용하여 이러한 난점을 해결할 수 있다.

$$G_n(s) = \frac{(s/\omega_1)^2 + 2\zeta(s/\omega_1) + 1}{(s/\omega_2)^2 + 2\zeta(s/\omega_2) + 1} \quad (5)$$

또한, 3p 성분이 피치 액츄에이터 통하여 풍력터빈에 미치는 영향을 차단하기 위하여, 식 (5) 구조의 3p 노치필터도 함께 사용되었다.

Fig. 14는 계인 스케줄링이 고려된 피치루프에 대하여 노치필터를 적용했을 때의 피치루프계인 전달함수의 주파수 응답이다. Fig. 12와 비교해보면, 10 rad/s와 19 rad/s에서 피크가 상당히 감소된 것을 확인할 수 있다. 또한, 약 3.8 rad/s 근처에서 주파수 응답의 크기가 크게 감소한 것을 볼 수 있는데, 이것은 3p 노치필터에 의한 것이다.

Fig. 15는 계인 스케줄링과 3 개의 노치필터를 적용하여 얻은 GH Bladed 시뮬레이션 결과이다. 또한, Fig. 16은 Fig. 15의 300~400초 구간을 확대하여 다시 그린 것이다. 노치 필터의 적용으로 각 신호의 응답이 훨씬 부드러워진 것을 확인할 수 있다.

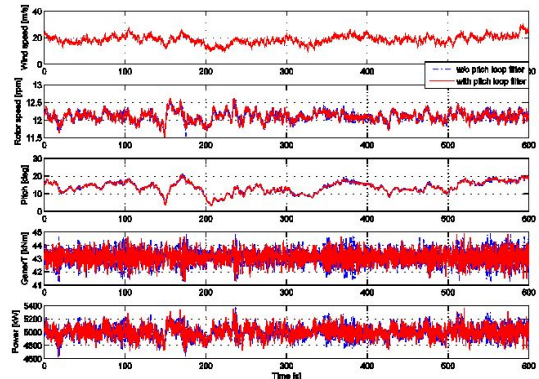


Fig. 15 Simulation results of using notch filter for 18 m/s turbulent wind

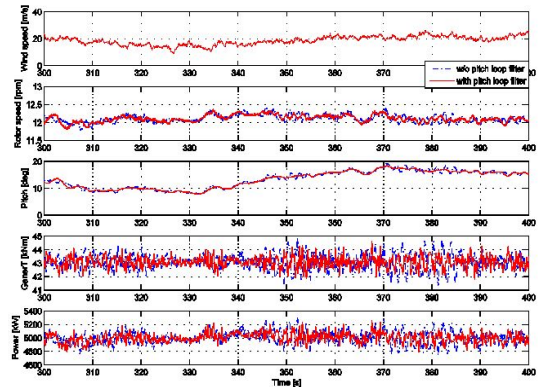


Fig. 16 Replot of Fig. 15 for the time span from 300 to 400 second

3. 결 론

본 논문에서는 NREL 5MW 풍력터빈의 제어시스템의 구조와 설계 이론에 대하여 논의하였다. 토크제어와 피치제어 루프 각각에 대하여 제어시스템 설계 요구조건과 이를 만족시키는 제어기 설계 방법을 제시하였다. 이와 아울러, 5MW 풍력터빈의 구조 진동모드, 즉 축진동 모드와 블레이드 평면내 진동모드들이 풍력터빈 구조물에 미치는 영향을 차단시키기 위하여 BPF와 노치필터의 적용에 대하여 논의하였다. 또한 로터회전에 의한 타워의 공진현상 가능성을 분석해 보고, 이를 방지하

는 공진회피 제어기법에 대하여 논의하였다. 설계된 제어 알고리즘은 풍력터빈 전용해석 소프트웨어인 GH Bladed를 사용하여 검증되었다.

후 기

이 논문은 2012년 정부(지식경제부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다. (런타임 풍력단지 예측제어 시스템 개발 -2012T100201670)

References

1. Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., and Scott, G., Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, Technical Report NREL/TP-500-38060, February 2009
2. van der Hooft, E.L, Schaak, P., van Engelen, T.G., "Wind Turbine Control Algorithm," ECN-C-03-111, 2003.
3. van der Hooft, E. and van Engelen, T., "Feedforward control of estimated wind speed," ECN-C-03-137, 2003.
4. Wright, A.D., Modern Control Design for flexible Wind Turbines, Technical Report NREL/TP-500-35816, July 2004
5. Wright, A.D. and Fingersh, L.J., Advanced Control Design for Wind Turbines Part I: Control Design, Implementation, and Initial Tests, Technical Report NREL/TP-500-42437, March 2008
6. Bossanyi, E., Controller for 5MW reference turbine, Project UpWind Report, 11593/BR/04, 2009.
7. Bossanyi, E. (2000). The design of closed loop controllers for wind turbines. Wind Energy, No. 3, pp. 149-163, ISSN: 1099-1824
8. Bossanyi, E. (2009). GH Bladed user manual (version3.81), Garrad Hassan and Partners, 282-BR-010
9. Nam, Y., Control of wind turbine, GS intervision, 2009.
10. Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., Bossanyi, E., Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons, 2nd Edition, 2011.
11. IEC 61400 1, "Wind turbine generator systems, Part 1: safety requirements," International Electrotechnical Commission, 1999.
12. Cho, J.H. and Nam, Y.S. and Kim, H.G. "The effects of gain scheduling, pitch loop bandwidth, and torque schedule change on the performance & mechanical load of MW wind turbine", 2010, Koera wind energy association conference