

NREL 5MW 풍력터빈 제어용 저주파 통과 필터와 드라이브 트레인 댐퍼의 효과 고찰

A Study on the Effect of Low Pass Filter and Drive Train Damper for the NREL 5MW Wind Turbine Control

임채욱^{1*}

Chae-Wook Lim^{1*}

〈Abstract〉

It is essential to examine and analyze the power output and load responses together using real-world turbulent wind speeds. In this paper, the power controller and the drive train damper are simultaneously considered using the NREL 5MW wind turbine model, and the damage equivalent load(DEL) of the low speed shaft torque and power output responses according to the natural frequency of the second order low pass filter are simultaneously investigated. Numerical testing is carried out above rated wind speed using commercially available Bladed software. From the viewpoints of DEL reduction of the drive train shaft torque and power output responses, it is shown that the natural frequency of the low pass filter is appropriately about 6 to 10rad/s. And the reduction ratio of the DEL of the low-speed shaft torque decreases as the wind speed becomes higher, and it is confirmed that the reduction ratio is limited to about 20% at high wind speeds.

Keywords : Drive Train Damper, Low Speed Shaft Torque, Low Pass Filter, Natural Frequency, Wind Turbine

^{1*} 정회원, 교신저자, 한밭대학교 기계공학과, 교수
E-mail: cwlim@hanbat.ac.kr

^{1*} Dept. of Mechanical Engineering, Hanbat National University

1. 서론

풍력터빈에서는 블레이드와 로터를 통하여 유용한 바람 에너지로부터 기계적 에너지로 변환된다. 이 기계적 에너지는 저속 축, 기어박스, 고속 축으로 구성된 드라이브 트레인을 통하여 전달되고, 고속 축에 연결된 발전기를 통하여 전기적 에너지로 변환된다(Fig. 1). 풍력터빈 기술은 신재생에너지 발전 기술 중 전 세계에서 가장 빠르게 성장하고 있다[1]. 태양광 발전과 함께 NREL 5MW 풍력터빈은 전형적인 육상과 해상 풍력터빈을 대표하는 것으로 알려져 있다[2]. MW급 풍력터빈을 대상으로 한 실용적인 연구 목적으로 NREL 5MW 풍력터빈은 지난 10여 년간 많이 사용되고 있다[3-7]. NREL 5MW 풍력터빈 모델을 이용하여 풍속에 따른 출력 응답과 하중 응답을 동시에 확인 및 분석하는 것은 필요하다.

풍력터빈을 통하여 바람 에너지로부터 전기 에너지를 추출하기 위해서는 출력 제어가 필수적으로 작동해야 한다. 또한, 출력 제어와 함께 풍력터빈의 드라이브 트레인에 작용하는 축 진동 하중을 줄이기 위한 하중 제어를 필수적으로 사용해야 한다[8, 9]. 출력 제어기는 발전기의 토크 크기를 조절하는 토크 출력 제어기와 블레이드의 피치각을 조절하는 피치 출력 제어기로 구분된다. 축 진동 하중을 줄이기 위한 하중 제어기는 드라이브 트레인 댐퍼(DTD; Drive Train Damper)를 적용하여 발전기의 토크 크기를 추가로 조절한다.

풍력터빈의 제어기에서는 센서를 통하여 측정이 용이한 발전기 회전 속도를 되먹임 신호로 사용한다. 토크 출력 제어기, 피치 출력 제어기, 드라이브 트레인 댐퍼 모두 엔코드 센서를 통하여 측정된 발전기 회전 속도 신호를 이용한다. 엔코드 센서를 통해 측정되는 신호에는 노이즈와 회전축의 진동 신호 등이 포함되어 있으므로 저주파 통과

필터(LPF; Low Pass Filter)를 필수적으로 이용한다[2, 10]. NREL 5MW 풍력터빈 관련 연구에서는 고유 진동수가 3.5rad/s인 2차 저주파 통과 필터를 사용하였는데, 근거에 대하여는 제시하지 않았다[10]. 본 논문에서는 출력 제어기를 위한 발전기 회전 속도 되먹임 신호에 2차의 저주파 통과 필터를 고려한다. 드라이브 트레인 댐퍼는 실제 풍력터빈에서는 2차의 대역 통과 필터를 주로 사용하는데[8, 9], 본 논문에서도 2차의 대역 통과 필터를 고려한다. 저주파 통과 필터를 사용하면 출력의 평균값, 발전기의 초과파워(overpower), 로터의 초과속도(overspeed) 등의 출력 응답과 드라이브 트레인의 저속 축 토크 크기 등에 동시에 영향을 미친다.

본 논문에서는 NREL 5MW 풍력터빈을 대상으로 출력 제어기와 드라이브 트레인 댐퍼를 모두 적용하여, 2차 저주파 통과 필터의 고유 진동수에 따른 드라이브 트레인 축의 등가 피로 하중과 출력 응답을 확인하여 적절한 고유 진동수 값을 제시한다. 풍속은 IEC Edition 3 Class A[11]에 해당하는 실제 난류 풍속을 이용하여 드라이브 트레인의 저속 축(LSS; Low Speed Shaft) 토크의 등가 피로 하중과 출력 응답을 확인한다. 그리고 드

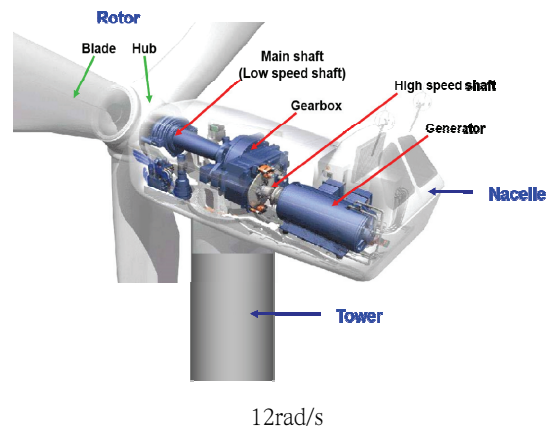


Fig. 1 MW wind turbine and its main components

라이브 트레인 댐퍼의 제어 게인의 크기에 따른 축 하중 저감 효과와 한계에 대하여 고찰한다. 풍력터빈용 전문 소프트웨어인 Bladed[12]를 이용하여 신뢰할만한 출력 응답과 하중 응답을 분석한 결과들이 제시된다.

2. NREL 5MW 풍력터빈

2.1 Bladed 모델

NREL 5MW 풍력터빈을 모델링하고 난류 풍속의 변동에 따른 신뢰할만한 출력 응답과 하중 응답을 확인하기 위해서는 풍력터빈 전용 상용 소프트웨어가 필요하다. NREL 5MW 풍력터빈 보고서에서는 블레이드의 공력 자료와 구조 파라미터값, 타워의 구조 파라미터값, 드라이브 트레인의 파라미터 값 등이 제시되었다[2]. 본 논문에서는 풍력터빈용 전문 소프트웨어인 Bladed를 이용하여 제시된 이들 자료를 입력하여 모델링하였다. NREL 5MW 풍력터빈의 주요 파라미터와 값은 Table 1과 같다. NREL 5MW 풍력터빈의 로터 직경은 126m이고, 정격 로터 속도는 12.1rpm, 정격 발

Table 1. Parameters of the NREL 5MW wind turbine

Description	Value
Rotor diameter [m]	126
Hub height [m]	90
Number of blade	3
Gearbox ratio	97
Rated power [MW]	5
Rated rotor speed [rpm]	12.1
Rated wind speed [m/s]	11.3
Cut-in wind speed [m/s]	3
Cut-out wind speed [m/s]	25

전기 속도는 1173.7rpm이다. Bladed로 모델링된 NREL 5MW 풍력터빈으로부터 출력계수를 구할 수 있다. 블레이드의 피치각이 0도일 때 최대 출력계수는 0.483임을 확인하였다. 풍속, 주속비, 피치각에 따른 출력계수의 특성을 반영하여 출력 제어기인 토크 출력 제어기와 피치 출력 제어기를 설계하였다. 드라이브 트레인 댐퍼는 드라이브 트레인 축의 고유 진동수를 이용하여 설계하였다.

2.2 출력 제어기와 드라이브 트레인 댐퍼

풍력터빈의 출력 제어기와 드라이브 트레인 댐퍼는 모두 발전기 회전 속도 신호를 되먹임하는 형태로 구현된다. 출력 제어기는 토크 출력 제어기와 피치 출력 제어기로 구성된다. 토크 출력 제어기는 정격 풍속 이하에서는 풍속의 크기에 따라 최적 주속비와 최대 출력 파워를 얻기 위하여 최적모드제인과 PI 제어기를 이용하는 형태로 구성된다. 정격 풍속 이상에서 토크 출력 제어기는 정격 출력 파워를 유지하기 위하여 정격 토크 크기를 유지하도록 한다. 피치 출력 제어기는 정격 풍속 이하에서는 최대 출력 파워를 얻기 위하여 블레이드의 최적 피치각인 0도를 유지하도록 한다. 정격 풍속 이상에서 피치 출력 제어기는 PI 제어기와 게인 스케줄러의 형태로 구성되어, 풍속의 크기에 따라 블레이드 피치각을 조절하여 정격 출력 파워를 얻도록 한다[7,8].

드라이브 트레인이 회전할 때 가장 큰 영향을 주는 것은 저속 축에서 발생하는 진동으로, 이는 기어박스의 하중에 직접적인 영향을 주게 된다. 풍력터빈에서는 드라이브 트레인의 진동을 줄이기 위한 수동형 댐퍼를 사용하지 않는다. 그러므로 풍력터빈의 출력 제어 시에 저속 축의 진동을 줄이기 위하여 필연적으로 능동형 드라이브 트레인 제어기를 사용해야 한다. 드라이브 트레인 제어기

는 드라이브 트레인의 고속 축에 연결된 발전기의 토크를 조절하는 형태이다. 풍력터빈에서는 이를 드라이브 트레인 댐퍼(DTD: Drive-Train Damper)라고 부른다. 되먹임 신호인 발전기 회전 속도로부터 축 진동 주파수의 신호를 추출하여 발전기 회전 속도와 같은 위상으로 발전기의 토크 크기를 조절하도록 드라이브 트레인 댐퍼를 설계한다. Bossanyi[8, 9]가 제안한 드라이브 트레인 댐퍼는 식 (1)과 같이 2차의 대역 통과 필터 형태이다. 식 (1)의 대역 통과 필터는 실제 풍력터빈 산업계에서 많이 사용하므로, 본 논문에서는 실용적 관점에서 식 (1)의 드라이브 트레인 댐퍼를 고려한다.

$$DTD(s) = Gain \frac{2\zeta_{dtd}\omega_{ndtd}s(\tau_{dtd}s + 1)}{s^2 + 2\zeta_{dtd}\omega_{ndtd}s + \omega_{ndtd}^2} \quad (1)$$

여기서 *Gain*은 DTD의 제어 게인, ω_{ndtd} 는 DTD의 고유 진동수, ζ_{dtd} 는 DTD의 감쇠비, 그리고 τ_{dtd} 는 DTD의 시상수이다.

NREL 5MW 풍력터빈의 경우 드라이브 트레인 축의 진동 주파수는 1.68Hz임을 확인하였다.

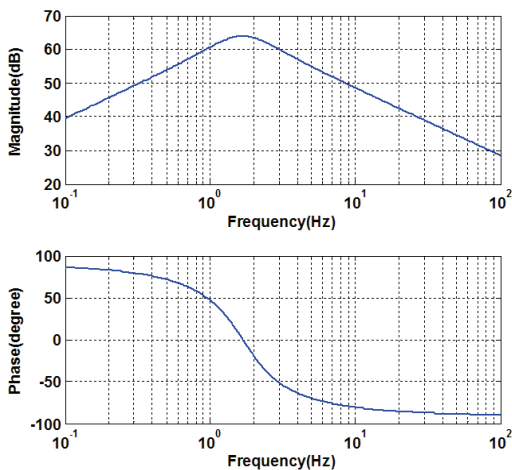


Fig. 2 Frequency responses for the drive-train damper

1.68Hz의 축 진동을 줄이기 위하여 드라이브 트레인 댐퍼의 파라미터 값과 게인 값을 선정하였다. *Gain*은 1,600Nm/(rad/s), ω_{ndtd} 는 10.56rad/s, ζ_{dtd} 는 0.5, 그리고 τ_{dtd} 는 0초로 선정하였다. Fig. 2는 설계된 드라이브 트레인 댐퍼의 주파수 응답의 크기와 위상을 보여준다. 주파수 응답의 크기는 1.68Hz에서 가장 크고, 주파수 응답의 위상은 1.68Hz에서 0도가 됨을 확인할 수 있다.

3. 수치실험 결과 및 분석

수치실험을 수행하기 위하여 풍력터빈용 전문 소프트웨어인 Bladed[12]를 이용하였다. Bladed에서 NREL 5MW 풍력터빈을 모델링한 후 IEC Edition 3 Class A[11]에 해당하는 10분의 실제 난류 풍속을 이용하여 정격 풍속 이상에서 수치실험을 수행하였다. 출력 제어를 위하여 되먹임하는 발전기 회전 속도 신호에 2차의 저주파 통과 필터를 사용하여 출력 응답을 확인하였다. 출력 응답은 출력의 평균값, 발전기의 초과파워(overpower), 로터의 초과속도(overspeed)를 분석하였다. 그리고 드라이브 트레인 댐퍼를 적용하였을 때의 축 하중 저감 효과를 확인하였다. 축 하중 저감 효과는 드라이브 트레인의 저속 축에 대한 등가 피로 하중(DEL: Damage Equivalent Load)을 분석하였다. 등가 피로 하중은 $1e7$ 반복 횟수와 S-N 기울기 4를 이용하였다.

3.1 저주파 통과 필터의 고유 진동수

풍력터빈의 출력 제어와 드라이브 트레인 댐퍼를 구현하기 위해서는 발전기 회전 속도 신호를 되먹임해야 한다. 발전기 회전 속도는 풍력터빈의

출력 제어기의 되먹임 신호로 실제 이용됨으로 무엇보다 중요하다. 드라이브 트레인 댐퍼의 경우도 발전기 회전 속도 신호가 동일하게 이용된다. 실제 발전기 회전 속도 신호에는 필연적인 센서의 노이즈가 포함되고, 또한 시스템적으로는 드라이브 트레인의 축 회전 방향에 대한 진동 신호가 함께 포함된다. 그러므로 저주파 통과 필터를 이용하여 발전기 회전 속도 신호에서 이들 불필요한 신호를 제거하는 것이 필요하다. 이 필터링 된 신호는 풍력터빈의 출력 제어기에 되먹임 신호로 사용된다. 그러나 대역 통과 필터 형태의 드라이브 트레인 댐퍼의 경우에는 저주파 통과 필터를 이용하지 않고 발전기 회전 속도 신호를 그대로 사용한다.

본 연구에서는 식 (2)와 같은 2차의 저주파 통과 필터를 적용하였고, 고유 진동수(ω_n)의 값에 따른 저속 축 토크에서의 등가 피로 하중과 출력 응답을 확인하였다. 2차의 저주파 통과 필터에서 감쇠비(ζ)는 1로 두었다.

$$LPF(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

평균 풍속이 12m/s, 16m/s, 20m/s, 24m/s인 난류 풍속에서 저주파 통과 필터의 고유 진동수에 따른 저속 축 토크의 등가 피로 하중을 확인하였는데, Fig. 3은 이의 결과를 보여 준다. 저속 축 토크의 등가 피로 하중은 대체로 고풍속이 될수록 커지는 경향을 보인다. 그러나 12m/s의 경우가 16m/s의 경우보다 저속 축 토크의 등가 피로 하중이 약간 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 정격 풍속 근처인 12m/s에서는 풍속이 정격 이하로 떨어지는 경우가 종종 발생하기 때문이다. 풍속이 정격 이하로 작아지면 피치각은 최소각인 0도로 제한되고 발전기 토크 크기 또한 급격히 정격 이하로 떨어진 후 정격 토크 크기로 회복하게 된다.

그리고 저주파 통과 필터의 고유 진동수가 너무 작으면 저속 축 토크의 등가 피로 하중은 커짐을 확인할 수 있다. 고유 진동수가 5rad/s 이하이면 저속 축 토크의 등가 피로 하중이 매우 커질 수 있으므로 적절하지 않음을 알 수 있다. 고유 진동수가 3rad/s인 경우 평균 풍속 12m/s, 16m/s에서 저속 축 토크의 등가 피로 하중이 매우 커짐을 확인할 수 있다. 고유 진동수가 3rad/s보다 작으면 저속 축 토크의 등가 피로 하중이 훨씬 커지는데, 이는 발전기 회전 속도의 되먹임 신호에 저주파 통과 필터를 필연적으로 사용해야 하는 이유를 보여준다. 또한, 저주파 통과 필터의 고유 진동수가 10rad/s 이상이면 모든 풍속에서 저속 축 토크의 등가 피로 하중이 거의 동일함을 확인할 수 있다. 그러므로 저속 축 토크의 등가 피로 하중 관점에서 평균 풍속 12m/s, 16m/s, 20m/s, 24m/s 모두를 살펴보면, 저주파 통과 필터의 고유 진동수가 6~10rad/s 정도가 적절함을 확인할 수 있다.

또한 저주파 통과 필터의 고유 진동수의 값에 따른 출력 응답을 함께 확인하였다. 드라이브 트레인 댐퍼는 반드시 출력 제어기와 함께 사용해야 한다. 되먹임되는 발전기 회전 속도 신호에 저주파 통과 필터를 사용하면 출력 응답에 영향을 준다. 정격 이상의 풍속에서 출력 제어용의 발전기 토크 크기는 정격 토크로 일정한 값을 유지한다. 드라이브 트레인 댐퍼를 추가로 함께 적용할 때는, 발전기 토크 크기는 Fig. 11과 같이 정격 토크를 중심으로 축 진동의 주파수에 따라 변동한다. 그러나 발전기 토크, 발전기 회전 속도, 출력 파워, 블레이드 피치 각의 평균값은 거의 일정하고 변동이 없음을 Figs. 4-7에서 확인할 수 있다. 그러므로 드라이브 트레인 댐퍼가 평균 출력 파워에 미치는 영향은 거의 없음을 확인할 수 있다. 다음으로 정격 풍속 이상에서 풍속의 변동으로 인한 순간 응답을 확인하였다. 로터 속도와 출력 파

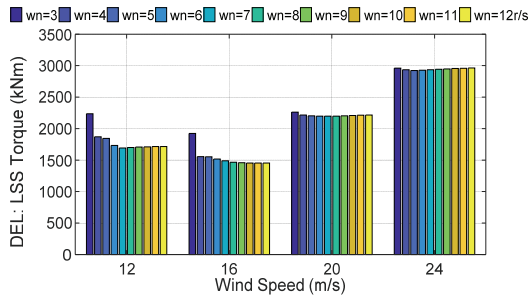


Fig. 3 DEL of low speed shaft torque

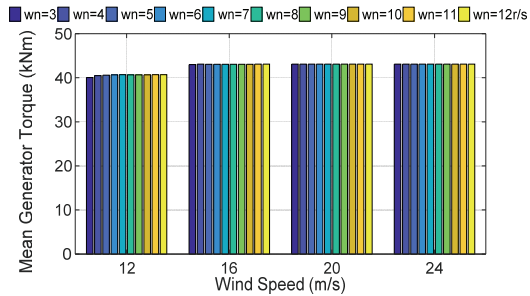


Fig. 4 Mean generator torque

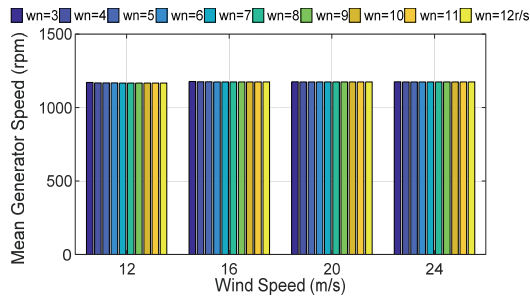


Fig. 5 Mean generator speed

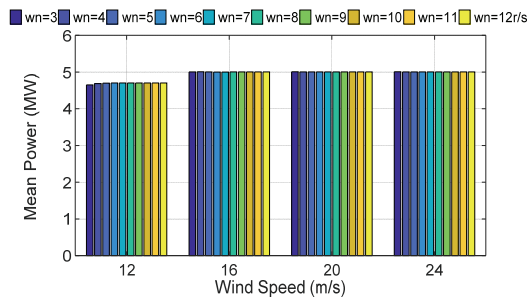


Fig. 6 Mean power

위의 순간 최대 응답은 풍력터빈을 보호하는 면에서 매우 중요하다. Fig. 8과 Fig. 9는 발전기의 초과파워(overpower)와 로터의 초과속도(overspeed)를 각각 보여준다. 평균 풍속이 12m/s, 16m/s, 20m/s, 24m/s인 난류 풍속에서 저주파 통과 필터의 고유 진동수가 작아질수록 전반적으로 초과파워와 초과속도가 커지는 경향을 확인할 수 있다. 고유 진동수가 5rad/s 이하이면 초과파워와

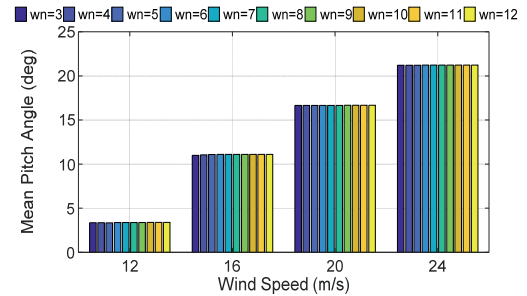


Fig. 7 Mean pitch angle

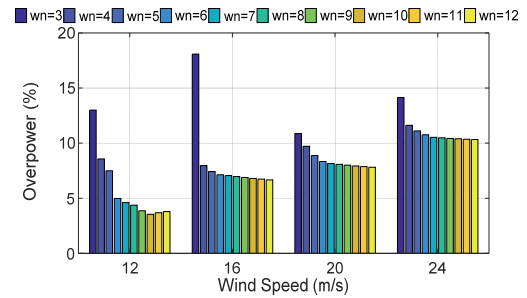


Fig. 8 Overpower of generator

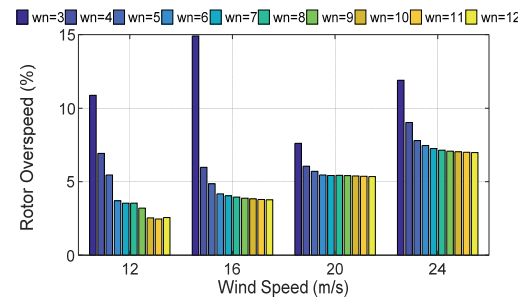


Fig. 9 Overspeed of rotor

초과속도가 매우 커질 수 있으므로 적절하지 않음을 알 수 있다. 고유 진동수가 3rad/s인 경우 대부분의 풍속에서 발전기의 초과파워와 로터의 초과속도가 매우 커짐을 확인할 수 있다. 16m/s인 경우 발전기의 초과파워는 약 18%이고 로터의 초과속도는 약 15%가 됨을 확인할 수 있다. 발전기의 초과파워와 로터의 초과속도가 10% 이상은 일반적으로 적절하지 않다. 고유 진동수가 3rad/s보다 작으면 발전기의 초과파워와 로터의 초과속도가 훨씬 커지는데, 이는 발전기 회전 속도의 되먹임 신호에 저주파 통과 필터를 필연적으로 사용해야 하는 이유를 보여준다.

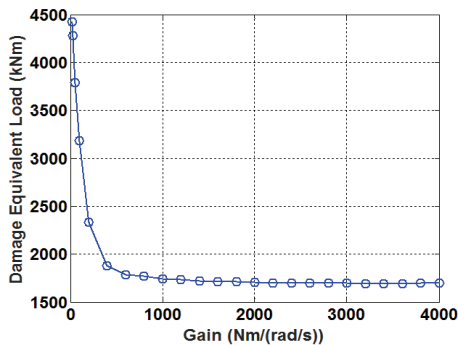
또한 저주파 통과 필터의 고유 진동수가 10rad/s 이상이면 모든 풍속에서 발전기의 초과파워와 로터의 초과속도가 거의 동일함을 확인할 수 있다. 그러므로 발전기의 초과파워와 로터의 초과속도 관점에서 평균 풍속 12m/s, 16m/s, 20m/s, 24m/s 모두를 살펴보면, 저주파 통과 필터의 고유 진동수가 6~10rad/s 정도가 적절함을 확인할 수 있다.

3.2 드라이브 트레인 댐퍼의 효과

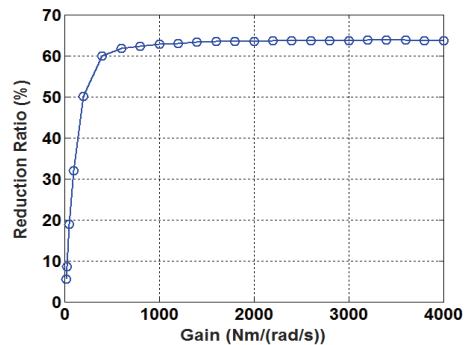
본 논문에서는 2차 저주파 통과 필터의 고유

진동수를 10rad/s로 선정하였다. 고유 진동수가 10rad/s일 때, 드라이브 트레인 댐퍼의 게인 값에 따른 제어 효과를 확인하였다. 평균 풍속이 12m/s인 난류 풍속에 대하여 드라이브 트레인 댐퍼의 작동으로 인한 저속 축 토크의 증가 피로 하중을 확인하였다. Fig. 10은 드라이브 트레인 댐퍼의 게인 값에 따른 저속 축 토크의 증가 피로 하중과 감소율을 보여 준다. 400Nm/(rad/s) 정도의 게인 값까지는 매우 급격하게 증가 피로 하중이 줄었다. 그러나 게인 값 1,000Nm/(rad/s) 이상에서는 감소한 증가 피로 하중이 거의 일정하였고, 증가 피로 하중의 감소율은 1% 정도의 범위로 적음을 확인할 수 있었다. 그러므로 드라이브 트레인 댐퍼의 게인 값을 1,000~2,000Nm/(rad/s) 정도의 범위에서 사용하면 충분하고, 이보다 더 큰 게인 값을 사용해도 저속 축 토크의 증가 피로 하중은 비슷함을 알 수 있다.

다음으로 2차 저주파 통과 필터의 고유 진동수가 10rad/s이고 드라이브 트레인 댐퍼의 게인 값이 1,600Nm/(rad/s)인 경우에 대하여 풍속별로 드라이브 트레인 댐퍼의 제어 효과를 확인하였다. Fig. 11은 평균 풍속이 12m/s인 난류 풍속에 대한 저속 축 토크의 시간 응답을 보여준다. 드라이브 트레인 댐퍼의 작동으로 저속 축 토크의 증가



(a) Damage equivalent load



(b) Reduction ratio

Fig. 10 DEL and reduction ratio of low speed shaft torque at 12m/s

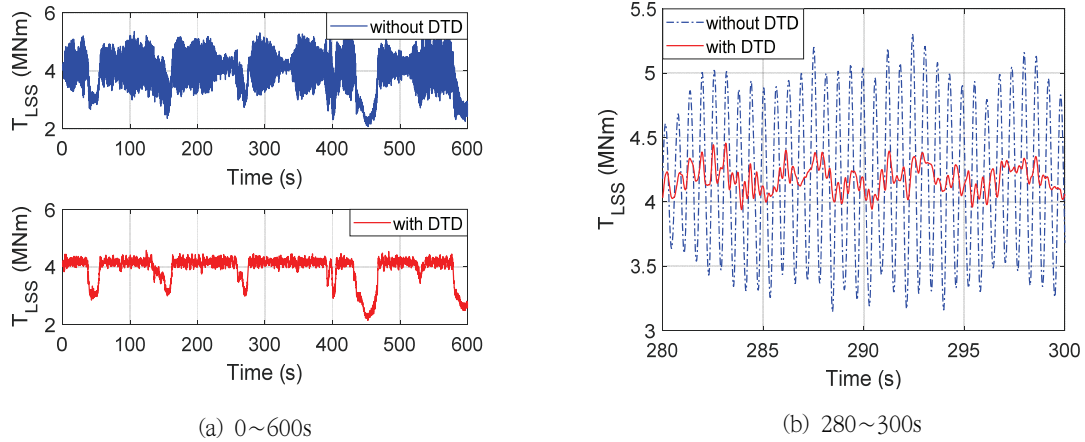


Fig. 11 Time responses of low speed shaft torque at 12m/s

피로 하중은 4.681MNm에서 1.709MNm로 약 63.5% 감소하였다. Fig. 12는 평균 풍속이 12~25m/s의 난류 풍속에 대한 저속 축 토크의 증가 피로 하중과 이의 감소율을 보여 준다. 풍속이 커짐에 따라서 저속 축 토크의 증가 피로 하중은 커지고 드라이브 트레인 댐퍼에 의한 감소율도 줄어드는 경향을 보였다. 평균 풍속이 16m/s, 20m/s, 24m/s인 난류 풍속에서 드라이브 트레인 댐퍼의 작동으로 34.9% (2.231 MNm에서 1.453MNm로), 23.6% (2.890MNm에서 2.208MNm로), 19.6%

(3.677MNm에서 2.956MNm로) 정도 감소함을 확인하였다. 저속 축 토크의 증가 피로 하중이 큰 고풍속에서는 감소율이 약 20% 정도로 한계가 있음을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 NREL 5MW 풍력터빈을 대상으

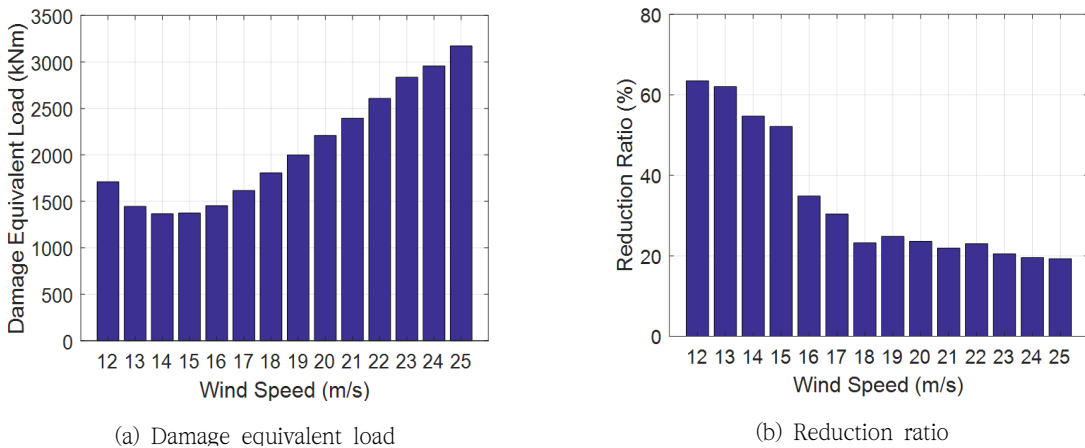


Fig. 12 DEL and reduction ratio of low speed shaft torque at 12~25m/s

로 출력 제어기와 드라이브 트레인 댐퍼를 동시에 적용하여, 되먹임 신호인 발전기 회전 속도에 대한 2차의 저주파 통과 필터의 영향과 드라이브 트레인 댐퍼의 축 진동 하중 저감 효과를 확인하였다.

드라이브 트레인 축의 등가 피로 하중 저감과 출력 응답 관점에서 저주파 통과 필터의 고유 진동수는 6~10rad/s 정도가 적절함을 확인할 수 있었다. 고유 진동수가 5rad/s 이하이면 저속 축 토크의 등가 피로 하중, 발전기의 초과파워, 로터의 초과속도가 매우 커질 수 있으므로 적절하지 않음을 확인할 수 있었다. 그리고 고유 진동수가 10rad/s 이상이면 모든 풍속에서 저속 축 토크의 등가 피로 하중, 발전기의 초과파워, 로터의 초과속도가 거의 동일함을 확인할 수 있었다.

다음으로 드라이브 트레인 댐퍼의 게인 값은 1,000~2,000Nm/(rad/s) 정도가 효과적이고 충분함을 확인할 수 있었다. 저속 축 토크의 등가 피로 하중은 대체로 고풍속이 될수록 커지는 경향을 보였다. 정격 풍속 이상에서 저속 축 토크의 등가 피로 하중의 감소율은 약 20~60% 정도이었고, 고풍속에서는 감소율이 20% 정도로 한계가 있음을 확인할 수 있었다.

사 사

이 논문은 2019년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(과제번호: 20193010025810)과 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2019R111A3A01059235)을 받아 수행된 연구입니다.

참고문헌

- [1] S. H. Lee, "Development of onshore offshore tower elevator with load distribution endless winder and integrated control panel", Journal of the Korean Society of Industry Convergence, vol. 22, no. 6, pp. 711-719, (2019).
- [2] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, and G. Scott, "Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development", Technical Report NREL/TP-500-38060, (2009).
- [3] Y. S. Nam, J. G. Kim, H. S. Choi, and J. H. Cho, "Power control of MW wind turbine", Transactions of the KSME(A), vol. 35, no. 1, pp. 11-15, (2011).
- [4] F. J. Tai, K. W. Kang, and J. H. Lee, "Study on the aerodynamics and control characteristics of 5MW wind turbine", New & Renewable Energy, vol. 7, no. 2, pp. 59-69, (2011).
- [5] Y. S. Nam and C. H. Im, "Control system design of NREL 5MW wind turbine", Solar Energy, vol. 32, no. 5, pp. 31-40, (2012).
- [6] C. J. Kim, K. S. Kim, Y. A. Song, and I. S. Paek, "Tower load reduction control by pitch loop individual gain scheduling", Journal of Wind Energy, vol. 9, no. 3, pp. 25-32, (2018).
- [7] W. Han, M. Jeon, and S. Lee, "Aerodynamics and structural dynamics of floating offshore wind turbine under different degrees of freedom", New & Renewable Energy, vol. 15, no. 4, pp. 11-20, (2019).
- [8] E. A. Bossanyi, "The design of closed loop controllers for wind turbines", Wind Energy, vol. 3, pp. 149-163, (2000).
- [9] T. Burton, N. Jenkins, D. Sharpe, and E. Bossanyi, "Wind energy handbook (2nd ed.)", John Wiley & Sons, Ltd., (2011).
- [10] Y. S. Nam, "Wind turbine system control", GS-Intervision, (2013).
- [11] IEC 61400-1 Third Edition, "Wind Turbines – Part 1: Design Requirements", (2005).
- [12] Bladed User Manual Version 4.9, (2018).