



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2019-0085384
(43) 공개일자 2019년07월18일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G05B 13/04 (2006.01) G05B 11/42 (2006.01)
G06F 17/50 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G05B 13/04 (2013.01)
F03D 17/00 (2016.05)
(21) 출원번호 10-2018-0003451
(22) 출원일자 2018년01월10일
심사청구일자 2018년01월10일

(71) 출원인
한밭대학교 산학협력단
대전광역시 유성구 동서대로 125 (덕명동)
(72) 발명자
임채욱
대전광역시 서구 월평동로 83, 다모아아파트 11
0동 1506호
신상건
부산광역시 남구 유엔로 15, 일신보라아파트 104
동 903호
(74) 대리인
특허법인 아이퍼스

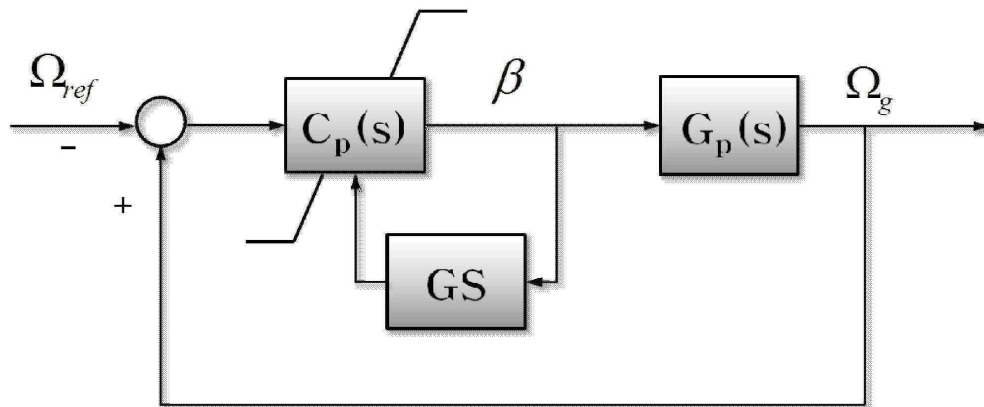
전체 청구항 수 : 총 15 항

(54) 발명의 명칭 피치응답의 상사성을 위한 풍력터빈용 시뮬레이터의 피치제어기 및 그 설계방법

(57) 요약

본 발명은 피치응답의 상사성을 위한 풍력터빈용 시뮬레이터의 피치제어기 및 그 설계방법에 대한 것이다. 보다 상세하게는 피치제어기를 갖는 대상 풍력터빈의 피치응답과 상사성을 갖도록 설계된 풍력터빈용 시뮬레이터의 피치제어기에 있어서, 상기 풍력터빈의 피치제어기와 상기 시뮬레이터의 피치제어기는 폐루프 피치제어시스템이고 PI제어기와, 게인 스케줄러를 포함하며, 상기 시뮬레이터의 피치제어기는 상기 풍력터빈의 피치제어기의 출력계수, 고유진동수 및 감쇠비와 대응되도록 설계되는 것을 특징으로 하는 피치응답의 상사성을 위한 풍력터빈용 시뮬레이터의 피치제어기에 관한 것이다.

대표도 - 도2



(52) CPC특허분류

F03D 7/048 (2013.01)

G05B 11/42 (2013.01)

G06F 17/5009 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 NRF-2015R1D1A3A01019361

부처명 교육부

연구관리전문기관 한국연구재단

연구사업명 지역대학우수과학자지원사업

연구과제명 MW급 대형 풍력터빈의 센서리스 개별피치제어기 개발

기 여 율 1/1

주관기관 한밭대학교 산학협력단

연구기간 2015.06.01 ~ 2018.05.31

명세서

청구범위

청구항 1

피치제어기를 갖는 대상 풍력터빈의 피치응답과 상사성을 갖도록 설계된 풍력터빈용 시뮬레이터의 피치제어기에 있어서,

상기 대상 풍력터빈의 피치제어기와 상기 시뮬레이터의 피치제어기는 페루프 피치제어시스템이고 PI제어기와, 게인 스케줄러를 포함하며,

상기 시뮬레이터의 피치제어기는 상기 풍력터빈의 피치제어기의 출력계수, 고유진동수 및 감쇠비와 대응되도록 설계되는 것을 특징으로 하는 피치응답의 상사성을 위한 풍력터빈용 시뮬레이터의 피치제어기.

청구항 2

제 1항에 있어서,

상기 게인 스케줄러는 블레이드 피치각이 커짐에 따라 설계된 상기 PI제어기의 PI게인값을 게인 제수로 나누도록 구성되는 것을 특징으로 하는 피치응답의 상사성을 위한 풍력터빈용 시뮬레이터의 피치제어기.

청구항 3

제 2항에 있어서,

공기역학 토크를 블레이드 피치각에 대해 편미분한 제1비선형 파라미터와 공기역학 토크를 로터속도에 대해 편미분한 제2비선형 파라미터는 PI 제어기의 P게인과 I게인에 영향을 미치는 것을 특징으로 하는 피치응답의 상사성을 위한 풍력터빈용 시뮬레이터의 피치제어기.

청구항 4

제 3항에 있어서,

상기 제1, 제2비선형 파라미터는 상기 페루프 피치제어시스템의 두 극점의 위치를 결정하는 상기 고유진동수와 상기 감쇠비에 영향을 미치는 것을 특징으로 하는 피치응답의 상사성을 위한 풍력터빈용 시뮬레이터의 피치제어기.

청구항 5

제 4항에 있어서,

상기 풍력터빈의 피치제어기의 게인 스케줄러의 게인 제수와, 상기 시뮬레이터의 피치제어기의 게인 스케줄러의 게인 제수는 서로 다른 것을 특징으로 하는 피치응답의 상사성을 위한 풍력터빈용 시뮬레이터의 피치제어기.

청구항 6

제 5항에 있어서,

정격풍속 근처에서 상기 시뮬레이터의 피치제어기의 고유진동수가 상기 풍력터빈의 피치제어기의 고유진동수와 동일하게 설계되고,

정지풍속 근처에서 상기 시뮬레이터의 피치제어기의 고유진동수를 상기 풍력터빈의 피치제어기의 고유진동수와 동일하게 설계하여 상기 시뮬레이터의 피치제어기의 게인 스케줄러의 게인 제수를 결정하는 것을 특징으로 하는 피치응답의 상사성을 위한 풍력터빈용 시뮬레이터의 피치제어기.

청구항 7

제 6항에 있어서,

정지풍속 근처에서의 피치각부터 설정피치각까지의 범위에서 상기 게인 제수는 1이고, 이하의 수학적 식 19와 수학적 식 20에 의해 P게인과 I게인 값이 결정되는 것을 특징으로 하는 피치응답의 상사성을 위한 풍력터빈용 시뮬레이터의 피치제어기:

[수학적 식 19]

$$\omega_n = \sqrt{-\frac{K_I N_{\beta_s}}{J_{eq}}}$$

[수학적 식 20]

$$\zeta = \frac{B_{eq} + B_{\Omega_s} - K_P N_{\beta_s}}{2\sqrt{J_{eq} K_I N_{\beta_s}}}$$

상기 수학적 식 19, 20에서, J_{eq} 는 등가 이산 관성모멘트, B_{eq} 는 등가 댐핑, N_{β_s} 는 제1비선형파라미터, B_{Ω_s} 는

제2비선형파라미터, K_P 는 P게인값, K_I 는 I게인값, ω_n 는 고유진동수, ζ 는 감쇠비이다.

청구항 8

제 7항에 있어서,

정지풍속 근처에서 상기 시뮬레이터의 피치제어기의 고유진동수가 상기 풍력터빈의 피치제어기의 고유진동수와 동일하게 설계하여 상기 시뮬레이터의 피치제어기의 게인 스케줄러의 게인 제수를 결정하고, 상기 정지풍속 근처의 피치각 이상의 범위에서 상기 결정된 게인 제수를 적용하는 것을 특징으로 하는 피치응답의 상사성을 위한 풍력터빈용 시뮬레이터의 피치제어기.

청구항 9

제 8항에 있어서,

상기 설정피치각과 상기 정지풍속 근처에서의 피치각 범위 내에서의 게인 제수는 피치각에 따라 비례하여 증가되는 것을 특징으로 하는 피치응답의 상사성을 위한 풍력터빈용 시뮬레이터의 피치제어기.

청구항 10

피치제어기를 갖는 대상 풍력터빈의 피치응답과 상사성을 갖도록 설계된 풍력터빈용 시뮬레이터의 피치제어기의 설계 방법에 있어서,

상기 풍력터빈을 1 질량 모델로 모델링하는 단계;

상기 풍력터빈의 출력계수의 최대값을 갖는 최적 TSR값과 최적 피치각값을 산출하고, 비선형 공기역학 토크를 선형화하는 단계;

공기역학 토크를 블레이드 피치각에 대해 편미분한 제1비선형 파라미터와 공기역학 토크를 로터속도에 대해 편미분한 제2비선형 파라미터를 산출하고, 상기 제1, 제2비선형 파라미터에 영향을 받으며 페루프 피치제어시스템의 두 극점의 위치를 결정하는 고유진동수와 감쇠비를 산출하는 단계; 및

페루프 피치제어시스템이고 PI제어기와, 게인 스케줄러를 포함하며, 상기 풍력터빈의 피치제어기와 출력계수, 고유진동수 및 감쇠비가 대응되도록 시뮬레이터의 피치제어기를 설계하는 단계;를 포함하는 것을 특징으로 하는 피치응답의 상사성을 위한 풍력터빈용 시뮬레이터의 피치제어기의 설계방법.

청구항 11

제 10항에 있어서,

상기 시뮬레이터의 PI제어기의 P 게인값과 I 게인값을 설계하는 단계; 및

상기 게인 스케줄러에 의해 블레이드 피치각이 커짐에 따라 설계된 상기 PI제어기의 P게인값과 I게인값을 게인 계수로 나누는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 피치응답의 상사성을 위한 풍력터빈용 시뮬레이터의 피치제어기의 설계방법.

청구항 12

제 11항에 있어서,

정격풍속 근처에서 상기 시뮬레이터의 피치제어기의 고유진동수가 상기 풍력터빈의 피치제어기의 고유진동수와 동일하게 설계되고,

정지풍속 근처에서 상기 시뮬레이터의 피치제어기의 고유진동수를 상기 풍력터빈의 피치제어기의 고유진동수와 동일하게 설계하여 상기 시뮬레이터의 피치제어기의 게인 스케줄러의 게인 계수를 결정하는 것을 특징으로 하는 피치응답의 상사성을 위한 풍력터빈용 시뮬레이터의 피치제어기의 설계방법.

청구항 13

제 12항에 있어서,

정격풍속 근처에서의 피치각부터 설정피치각까지의 범위에서 상기 게인 계수는 1이고, 이하의 수학식 19와 수학식 20에 의해 P게인과 I게인 값이 결정되는 것을 특징으로 하는 피치응답의 상사성을 위한 풍력터빈용 시뮬레이터의 피치제어기의 설계방법:

[수학식 19]

$$\omega_n = \sqrt{-\frac{K_I N_{\beta_g}}{J_{eq}}}$$

[수학식 20]

$$\zeta = \frac{B_{eq} + B_{\Omega_g} - K_P N_{\beta_g}}{2\sqrt{J_{eq} K_I N_{\beta_g}}}$$

상기 수학적 식 19, 20에서, J_{eq} 는 등가 이산 관성모멘트, B_{eq} 는 등가 댐핑, $N_{\beta_{\varepsilon}}$ 는 제1비선형파라미터, $B_{\Omega_{\varepsilon}}$ 는 제2비선형파라미터, K_p 는 P게인값, K_I 는 I게인값, ω_n 는 고유진동수, ζ 는 감쇠비이다.

청구항 14

제 13항에 있어서,

정지풍속 근처에서 상기 시뮬레이터의 피치제어기의 고유진동수를 상기 풍력터빈의 피치제어기의 고유진동수와 동일하게 설계하여 상기 시뮬레이터의 피치제어기의 게인 스케줄러의 게인 제수를 결정하고, 상기 정지풍속 근처의 피치각 이상의 범위에서 상기 결정된 게인 제수를 적용하는 것을 특징으로 하는 피치응답의 상사성을 위한 풍력터빈용 시뮬레이터의 피치제어기의 설계방법.

청구항 15

제 14항에 있어서,

상기 설정피치각과 상기 정지풍속 근처에서의 피치각까지의 범위에서 게인 제수는 피치각에 따라 비례하여 증가되는 것을 특징으로 하는 피치응답의 상사성을 위한 풍력터빈용 시뮬레이터의 피치제어기의 설계방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 피치응답의 상사성을 모사하기 위한 풍력터빈용 시뮬레이터의 피치제어기 및 그 설계방법에 대한 것이다.

배경 기술

[0002] 풍력터빈(Wind turbine)은 바람이 가진 에너지로 블레이드를 회전시켜 기계적인 에너지로 전환하여 발전기를 통하여 전기를 생산하는 기계이다. 최근 풍력터빈은 대형화되는 추세로 수-MW급이 시장의 주류를 형성하고 있고, 오늘날 대부분은 패더링 방향의 피치 제어(pitch-to-feather) 방식의 가변속도-가변피치(variable-speed variable-pitch) 형태를 취하고 있다.

[0003] 풍력터빈에서 요구되는 출력(output power)을 생산하기 위해서는 풍속의 변동에 따라 발전기의 토크크기(torque magnitude) 및 블레이드 피치각(blade pitch angle)을 적절하게 제어해야 하며, 높은 신뢰성 및 안정성 확보를 위해서 작동 시작에서부터 정지 시까지 적절하게 제어 및 운용되어야 한다.

[0004] 풍력터빈이 대형화됨에 따라 정격풍속(rated wind speed) 이상에서 작동하는 피치제어의 중요성이 더욱 커지고 있다. 풍력터빈에서 출력제어 관점에서의 피치제어의 목적은 정격풍속 이상에서 블레이드 피치각을 조절하여 생산되는 출력이 항상 정격값을 유지하도록 만들고, 풍속의 변화에 대하여 출력의 변동을 줄이는 것이다.

[0005] 풍력터빈의 제어에 있어서 중요하게 고려되어야 할 사항은 바람과 블레이드의 상호작용에 의한 공기 역학적 토크(aerodynamic torque)의 비선형성(nonlinearity)이다. 블레이드, 로터, 회전축, 기어박스, 타워, 발전기 등 풍력터빈의 각 구성요소들을 선형모델로 가정하더라도, 풍력터빈은 공기역학 토크의 비선형성으로 인해 전체 거동은 비선형적인 특성을 보이게 된다.

[0006] 풍력터빈의 피치제어기는 선형 제어기 또는 비선형 제어기의 형태로 설계되어 실제의 풍력터빈에 적용되고 있다. 또한 풍력터빈의 피치제어기의 설계에 관한 연구결과들이 논문과 연구기관의 보고서 등을 통하여 발표되고 있다. 실제 풍력터빈의 피치제어기에는 게인 스케줄러를 갖는 PI제어기(PI controller with a gain scheduler)가 대표적이며 일반적으로 많이 사용되고 있다

[0007] 실제 현장에 수-MW급 풍력 터빈을 설치하기 전에 토크제어기와 피치제어기로 구성된 실험실에서 출력 제어 시스템의 특성과 효율성을 검증해야 한다. 이를 위해, 모터-발전기 세트, 즉 소형 풍력터빈 시뮬레이터를 사용하여

관련 연구가 수행된다. 소형 풍력터빈 시뮬레이터에는 모터, 기어 박스, 플라이휠 및 발전기가 회전축에 연결된다. 모터는 바람과 블레이드 사이의 상호 작용에 의해 생성된 로터의 공기역학 토크를 만드는데 사용된다. 발전기는 풍력터빈의 토크제어기에 의해 제어되는 토크 크기를 조절하는 데 사용된다.

- [0008] 종래 수-MW 풍력터빈을 대상으로 하는 소형 시뮬레이터에 관한 연구가 진행되어 왔지만, 토크제어 관점에서의 알고리즘의 검증과 전기적인 관점에서 발전기 및 인버터의 검증에 대해 주로 연구되어 왔다.
- [0009] 피치제어기는 토크제어기에 비해서 매우 빠른 주파수 특성을 지니고 있으며 출력에도 매우 민감하게 영향을 미친다. 따라서 수-MW급 풍력터빈의 피치제어기의 고효율성과 안정성을 확보하기 위한 연구를 수행하기 위해, 수-MW급 풍력터빈의 피치제어기의 응답특성을 유사하게 모사할 수 있는 실험실 규모의 소형 풍력터빈 시뮬레이터가 필요하다.
- [0010] 종래 연구에서는 3MW급 풍력터빈을 대상으로 소형 20kW급 풍력터빈 시뮬레이터 토크제어기 뿐만 아니라 피치제어기를 동시에 적용한 예가 있다.
- [0011] 그러나 이러한 종래 3MW 풍력터빈의 피치제어기와 소형 20kW 풍력터빈 시뮬레이터의 피치제어기의 응답특성의 상사성 관점에서는 확인하거나 제시되어 있지 않았다. 이는 피치제어기의 설계 시에 필요한 공기역학 토크의 비선형성에 대한 정보를 반영하지 않았기 때문이다.
- [0012] 본 발명은 소형 풍력터빈 시뮬레이터의 피치 응답의 상사성(similarity)에 관한 것이다.
- [0013] 풍력터빈에서 피치제어기의 응답특성을 확인하기 위해서는, 피치제어기의 설계시의 공기역학 토크의 비선형성이 피치제어기의 극점(poles)에 미치는 영향을 해석 및 확인하는 것이 매우 중요하다.
- [0014] 본 발명에서는 개인 스케줄러를 갖는 피치 PI제어기를 고려하여, 정격풍속 이상에서 풍력터빈의 공기역학 토크의 비선형성이 폐루프(closed-loop) 피치제어시스템의 극점에 미치는 영향을 분석하여 피치 반응 특성을 살펴보고자 한다.
- [0015] 이를 위하여 비선형적 공기역학 토크를 선형화(linearization)하여 회전속도와 블레이드 피치각에 대한 공기역학 토크의 변화를 나타내는 두 개의 비선형 파라미터를 동작 풍속에 대하여 구한다. 그리고 이 두개의 비선형 파라미터가 폐루프 피치제어시스템의 특성을 결정하는 극점의 위치와 연관된 두 물리적 파라미터인 고유 진동수와 감쇠비에 미치는 영향을 분석한다.
- [0016] 2MW 풍력터빈과 이를 모사(emulate)하는 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터를 대상으로 두 개의 비선형 파라미터가 폐루프 피치제어시스템의 극점에 미치는 영향을 분석하여 피치응답의 상사성을 비교한다. 그리고 정격풍속 이상에서의 계단 풍속(step wind speeds)을 이용하여 고려된 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터는 피치응답 면에서 실제 2MW 풍력터빈과 유사한 특성을 가짐을 수치 시뮬레이션(numerical simulations)을 통하여 보이고자 한다.

선행기술문헌

특허문헌

- [0017] (특허문헌 0001) 대한민국 등록특허 10-1679704
(특허문헌 0002) 대한민국 등록특허 10-1734757
(특허문헌 0003) 대한민국 등록특허 10-1294929
(특허문헌 0004) 대한민국 등록특허 10-1716074

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0018] 따라서 본 발명은 상기와 같은 종래의 문제점을 해결하기 위하여 안출된 것으로서, 본 발명의 일실시예에 따르면, 실제 2MW 풍력터빈의 피치응답 특성을 모사하는(emulate) 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터의 피치제어기를 설계하는 방법을 제공하는 데 그 목적이 있다.

[0019] 또한, 본 발명의 일실시에 따르면, 설계된 피치 PI 제어기와 계인 스케줄러를 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터에 적용하면 실제 2MW 풍력터빈과 매우 유사한 피치응답을 얻을 수 있는 피치응답의 상사성을 위한 풍력터빈용 시뮬레이터의 피치제어기 및 그 설계방법을 제공하는데 그 목적을 갖는다.

[0020] 한편, 본 발명에서 이루고자 하는 기술적 과제들은 이상에서 언급한 기술적 과제들로 제한되지 않으며, 언급하지 않은 또 다른 기술적 과제들은 아래의 기재로부터 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

과제의 해결 수단

[0021] 본 발명의 제1목적은, 피치제어기를 갖는 수-MW 급 풍력터빈의 피치응답과 상사성을 갖도록 설계된 풍력터빈용 시뮬레이터 피치제어기에 있어서, 상기 풍력터빈의 피치제어기와 상기 시뮬레이터의 피치제어기는 페루프 피치제어시스템이고 PI제어기와, 계인 스케줄러를 포함하며, 상기 시뮬레이터의 피치제어기는 상기 풍력터빈의 피치제어기의 출력계수, 고유진동수 및 감쇠비와 대응되도록 설계되는 것을 특징으로 하는 피치응답의 상사성을 위한 풍력터빈용 시뮬레이터의 피치제어기로서 달성될 수 있다.

[0022] 그리고 계인 스케줄러는 블레이드 피치각이 커짐에 따라 설계된 상기 PI제어기의 PI계인값을 계인 계수로 나누도록 구성되는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0023] 또한, 공기역학토크를 블레이드 피치각에 대해 편미분한 제1비선형 파라미터와 공기역학토크를 로터속도에 대해 편미분한 제2비선형 파라미터는 PI 제어기의 P계인과 I계인에 영향을 미치는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0024] 그리고 상기 제1, 제2비선형 파라미터는 상기 페루프 피치제어시스템의 두 극점의 위치를 결정하는 상기 고유진동수와 상기 감쇠비에 영향을 미치는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0025] 또한 풍력터빈의 피치제어기의 계인 스케줄러의 계인 계수와, 상기 시뮬레이터의 피치제어기의 계인 스케줄러의 계인 계수는 서로 다른 것을 특징으로 할 수 있다.

[0026] 그리고 정격풍속 근처에서 상기 시뮬레이터의 피치제어기의 고유진동수가 상기 풍력터빈의 피치제어기의 고유진동수와 동일하게 설계되고, 정지풍속 근처에서 상기 시뮬레이터의 피치제어기의 고유진동수를 상기 풍력터빈의 피치제어기의 고유진동수와 동일하게 설계하여 상기 시뮬레이터의 피치제어기의 계인 스케줄러의 계인 계수를 결정하는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0027] 또한 정격풍속 근처에에서의 피치각부터 설정피치각까지의 범위에서 상기 계인 계수는 1이고, 이하의 수학적 식 19와 수학적 식 20에 의해 P계인과 I계인 값이 결정되는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0028] [수학적 식 19]

$$\omega_n = \sqrt{-\frac{K_I N_{\beta_\xi}}{J_{eq}}}$$

[0029]

[0030] [수학적 식 20]

$$\zeta = \frac{B_{eq} + B_{\Omega_\xi} - K_P N_{\beta_\xi}}{2\sqrt{J_{eq} K_I N_{\beta_\xi}}}$$

[0031]

[0032] 상기 수학적 식 19, 20에서, J_{eq} 는 등가 이산 관성모멘트, B_{eq} 는 등가 댐핑, N_{β_ξ} 는 제1비선형파라미터, B_{Ω_ξ} 는

제2비선형파라미터, K_P 는 P계인값, K_I 는 I계인값, ω_n 는 고유진동수, ζ 는 감쇠비이다.

[0033] 그리고 정지풍속 근처에서 상기 시뮬레이터의 피치제어기의 고유진동수가 상기 풍력터빈의 피치제어기의 고유진동수와 동일하게 설계하여 상기 시뮬레이터의 피치제어기의 계인 스케줄러의 계인 계수를 결정하고, 상기 정지

풍속의 피치각 이상의 범위에서 상기 결정된 계인 제수를 적용하는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0034] 또한 설정피치각과 상기 정지풍속에서의 피치각 범위 내에서의 계인 제수는 피치각에 따라 비례하여 증가되는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0035] 본 발명의 제2목적은 수-MW 급 풍력터빈의 피치응답과 상사성을 갖도록 설계된 풍력터빈용 시뮬레이터의 피치제어기의 설계 방법에 있어서, 상기 풍력터빈을 1질량 모델로 모델링하는 단계; 상기 풍력터빈의 출력계수의 최대값을 갖는 최적 TSR값과 최적 피치각값을 산출하고, 비선형 공기역학토크를 선형화하는 단계; 공기역학토크를 블레이드 피치각에 대해 편미분한 제1비선형 파라미터와 공기역학토크를 로터속도에 대해 편미분한 제2비선형 파라미터를 산출하고, 상기 제1, 제2비선형 파라미터에 영향을 받으며 페루프 피치제어시스템의 두 극점의 위치를 결정하는 고유진동수와 감쇠비를 산출하는 단계; 및 페루프 피치제어시스템이고 PI제어기와, 계인 스케줄러를 포함하며, 상기 풍력터빈의 피치제어기의 출력계수, 고유진동수 및 감쇠비와 대응되도록 시뮬레이터의 피치제어기를 설계하는 단계;를 포함하는 것을 특징으로 하는 피치응답의 상사성을 위한 풍력터빈용 시뮬레이터의 피치제어기의 설계방법으로서 달성될 수 있다.

[0036] 그리고 시뮬레이터의 PI제어기의 P 계인값과 I 계인값을 설계하는 단계; 및 상기 계인 스케줄러에 의해 블레이드 피치각이 커짐에 따라 설계된 상기 PI제어기의 P계인값과 I계인값을 계인 제수로 나누는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0037] 또한, 정격풍속 근처에서 상기 시뮬레이터의 피치제어기의 고유진동수가 상기 풍력터빈의 피치제어기의 고유진동수와 동일하게 설계되고, 정지풍속 근처에서 상기 시뮬레이터의 피치제어기의 고유진동수를 상기 풍력터빈의 피치제어기의 고유진동수와 동일하게 설계하여 상기 시뮬레이터의 피치제어기의 계인 스케줄러의 계인 제수를 결정하는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0038] 그리고 정격풍속에서의 피치각부터 설정피치각까지의 범위에서 상기 계인 제수는 1이고, 이하의 수학식 19와 수학식 20에 의해 P계인과 I계인 값이 결정되는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0039] [수학식 19]

$$\omega_n = \sqrt{-\frac{K_I N_{\beta_s}}{J_{eq}}}$$

[0040]

[0041] [수학식 20]

$$\zeta = \frac{B_{eq} + B_{\Omega_s} - K_P N_{\beta_s}}{2\sqrt{J_{eq} K_I N_{\beta_s}}}$$

[0042]

[0043] 상기 수학식 19, 20에서, J_{eq} 는 등가 이산 관성모멘트, B_{eq} 는 등가 댐핑, N_{β_s} 는 제1비선형파라미터, B_{Ω_s} 는 제2비선형파라미터, K_P 는 P계인값, K_I 는 I계인값, ω_n 는 고유진동수, ζ 는 감쇠비이다.

[0044] 또한 정지풍속 근처에서 상기 시뮬레이터의 피치제어기의 고유진동수를 상기 풍력터빈의 피치제어기의 고유진동수와 동일하게 설계하여 상기 시뮬레이터의 피치제어기의 계인 스케줄러의 계인 제수를 결정하고, 상기 정지풍속의 피치각 이상의 범위에서 상기 결정된 계인 제수를 적용하는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0045] 그리고 설정피치각과 상기 정지풍속에서의 피치각까지의 범위에서 계인 제수는 피치각에 따라 비례하여 증가되는 것을 특징으로 할 수 있다.

발명의 효과

[0046] 본 발명의 일실시예에 따른 피치응답의 상사성을 위한 풍력터빈용 시뮬레이터의 피치제어기 및 그 설계방법에 따르면, 실제 2MW 풍력터빈의 피치응답 특성을 모사하는(emulate) 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터의 피치제어

기를 설계할 수 있다.

[0047] 또한, 본 발명의 일실시예에 따른 피치응답의 상사성을 위한 풍력터빈용 시뮬레이터의 피치제어기 및 그 설계방법에 따르면, 설계된 피치 PI 제어기와 게인 스케줄러를 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터에 적용하면 실제 2MW 풍력터빈과 매우 유사한 피치응답을 얻을 수 있는 효과를 갖는다.

[0048] 한편, 본 발명에서 얻을 수 있는 효과는 이상에서 언급한 효과들로 제한되지 않으며, 언급하지 않은 또 다른 효과들은 아래의 기재로부터 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

도면의 간단한 설명

[0049] 본 명세서에 첨부되는 다음의 도면들은 본 발명의 바람직한 일실시예를 예시하는 것이며, 발명의 상세한 설명과 함께 본 발명의 기술적 사상을 더욱 이해시키는 역할을 하는 것이므로, 본 발명은 그러한 도면에 기재된 사항에만 한정되어 해석되어서는 아니 된다.

도 1은 2MW 풍력터빈의 출력계수 그래프,

도 2는 본 발명에 따른 풍력터빈의 페루프 피치제어시스템의 블록도,

도 3은 본 발명의 실시예에서 고려된 2MW 풍력터빈에 대한 풍속에 따른 $N_{\beta g}$ 의 변화그래프,

도 4는 본 발명의 실시예에 따른 피치각에 따른 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터와 2MW 풍력터빈의 게인 스케줄러의 게인 제수(gain divisor) 그래프,

도 5는 본 발명의 실시예에 따른 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터,

도 6은 본 발명의 실시예에 따른 풍속에 대한 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터에 대한 $N_{\beta g}$ 값 그래프

도 7 내지 도 9는 본 발명의 실시예에 따른 세 경우의 계단풍속에 대한 각각의 발전기 속도에 대한 피치응답을 비교 그래프를 도시한 것이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0050] 이상의 본 발명의 목적들, 다른 목적들, 특징들 및 이점들은 첨부된 도면과 관련된 이하의 바람직한 실시예들을 통해서 쉽게 이해될 것이다. 그러나 본 발명은 여기서 설명되는 실시예들에 한정되지 않고 다른 형태로 구체화될 수도 있다. 오히려, 여기서 소개되는 실시예들은 개시된 내용이 철저하고 완전해질 수 있도록 그리고 통상의 기술자에게 본 발명의 사상이 충분히 전달될 수 있도록 하기 위해 제공되는 것이다.

[0051] 본 명세서에서, 어떤 구성요소가 다른 구성요소 상에 있다고 언급되는 경우에 그것은 다른 구성요소 상에 직접 형성될 수 있거나 또는 그들 사이에 제 3의 구성요소가 개재될 수도 있다는 것을 의미한다. 또한 도면들에 있어서, 구성요소들의 두께는 기술적 내용의 효과적인 설명을 위해 과장된 것이다.

[0052] 본 명세서에서 기술하는 실시예들은 본 발명의 이상적인 예시도인 단면도 및/또는 평면도들을 참고하여 설명될 것이다. 도면들에 있어서, 막 및 영역들의 두께는 기술적 내용의 효과적인 설명을 위해 과장된 것이다. 따라서 제조 기술 및/또는 허용 오차 등에 의해 예시도의 형태가 변형될 수 있다. 따라서 본 발명의 실시예들은 도시된 특정 형태로 제한되는 것이 아니라 제조 공정에 따라 생성되는 형태의 변화도 포함하는 것이다. 예를 들면, 직각으로 도시된 영역은 라운드지거나 소정 곡률을 가지는 형태일 수 있다. 따라서 도면에서 예시된 영역들은 속성을 가지며, 도면에서 예시된 영역들의 모양은 소자의 영역의 특정 형태를 예시하기 위한 것이며 발명의 범주를 제한하기 위한 것이 아니다. 본 명세서의 다양한 실시예들에서 제1, 제2 등의 용어가 다양한 구성요소들을 기술하기 위해서 사용되었지만, 이들 구성요소들이 이 같은 용어들에 의해서 한정되어서는 안 된다. 이들 용어들은 단지 어느 구성요소를 다른 구성요소와 구별시키기 위해서 사용되었을 뿐이다. 여기에 설명되고 예시되는 실시예들은 그것의 상보적인 실시예들도 포함한다.

[0053] 본 명세서에서 사용된 용어는 실시예들을 설명하기 위한 것이며 본 발명을 제한하고자 하는 것은 아니다. 본 명세서에서, 단수형은 문구에서 특별히 언급하지 않는 한 복수형도 포함한다. 명세서에서 사용되는 '포함한다(comprises)' 및/또는 '포함하는(comprising)'은 언급된 구성요소는 하나 이상의 다른 구성요소의 존재 또는 추

가를 배제하지 않는다.

[0054] 아래의 특정 실시예들을 기술하는데 있어서, 여러 가지의 특정적인 내용들은 발명을 더 구체적으로 설명하고 이해를 돕기 위해 작성되었다. 하지만 본 발명을 이해할 수 있을 정도로 이 분야의 지식을 갖고 있는 독자는 이러한 여러 가지의 특정적인 내용들이 없어도 사용될 수 있다는 것을 인지할 수 있다. 어떤 경우에는, 발명을 기술하는 데 있어서 흔히 알려졌으면서 발명과 크게 관련 없는 부분들은 본 발명을 설명하는데 있어 별 이유 없이 혼돈이 오는 것을 막기 위해 기술하지 않음을 미리 언급해 둔다.

[0056]본 발명에서는 기어 타입 풍력터빈이 고려되지만, 기어비가 1인 기어가 없는 직접 구동형 풍력터빈을 포함한다. 풍력터빈의 피치제어기를 설계하기 위해서는 블레이드의 피치각과 발전기 속도 사이의 관계를 표현하는 수학적 모델이 필요하다. 풍력터빈의 상세한 동적 거동을 수학적 모델로 구하면 매우 큰 고차 운동방정식으로 표현된다. 출력제어 외에 진동에 의한 부하제어까지 고려하기 위해서는 2 질량모델 이상의 고차 수학적 모델이 필요하다. 그러나 본 발명에서는 풍력터빈의 출력제어만을 다루기 때문에 1 질량모델로 운동방정식을 표현한다.

[0057]1 질량 모델은 회전축 강성과 구동 트레인의 감쇠를 고려하지 않은 풍력터빈의 동력 제어에 필요한 모델이다. 피치제어기는 발전기 회전속도를 피드백 신호로 사용한다. 그리고 블레이드의 피치각은 일반적으로 피치 게인 스케줄러에 사용되어 진다

[0058]1 질량 모델에 필요한 물리적 파라미터는 로터반경(R), 로터의 질량 관성 모멘트(J_r), 발전기의 질량 관성 모멘트(J_g), 로터의 댐핑(B_r) 및 기어 박스의 기어비(N_{gb})이다. 기어 박스로 풍력터빈의 동적 거동을 표현하는 1 질량 모델에 대한 미분 방정식은 로터 속도(Ω_r) 또는 발전기 속도(Ω_g)를 상태로 가질 수 있다. 피치제어기의 피드백 신호가 발전기 속도이기 때문에 발전기 속도를 상태로 갖는 운동 방정식은 이하의 수학적 식 1과 같이 1차 미분 방정식이다.

[0059] [수학적 식 1]

$$J_{eq} \dot{\Omega}_g(t) + B_{eq} \Omega_g(t) = T_{eq}(t) - T_g(t)$$

[0060]

[0061]수학적 식 1에서 이하의 수학적 식 2에서와 같이, J_{eq} 는 등가 이산 관성모멘트(the equivalent mass moment of inertia) B_{eq} 는 등가 댐핑(equivalent damping), T_{eq} 는 등가 공기역학 토크, T_g 는 발전기 토크이다.

[0062] [수학적 식 2]

$$J_{eq} = J_g + \frac{J_r}{N_{gb}^2}$$

[0063]

[0064] [수학적 식 3]

$$B_{eq} = \frac{B_r}{N_{gb}^2}$$

[0065]

[0066] [수학적 식 4]

$$T_{eq} = \frac{T_r}{N_{gb}}$$

[0067]

[0068]그리고 로터의 공기역학 토크(T_r)는 이하의 수학적 식 5로 표현될 수 있다.

[0069] [수학식 5]

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

[0070]

[0071] 수학식 5에서 ρ 는 공기 밀도, V 는 로터 허브에서의 풍속, β 는 블레이드의 피치각, C_p 는 출력 계수, 그리고 λ 는 선단 속도비(TSR)이다. 이하의 수학식 6에서와 같이, TSR은 블레이드 선단에서의 선속도와 로터 허브에서의 풍속의 비율로 정의된다. 또한, 출력 계수는 블레이드의 TSR 및 피치각의 함수로 표현된다.

[0072] [수학식 6]

$$\lambda = \frac{\Omega_r R}{V}$$

[0073]

[0075] 바람과 블레이드의 상호작용에 의해 로터에서 발생하는 공기역학 토크(T_r)은 출력 계수(C_p)를 사용하여 수학식 5와 같이 풍속(V)의 함수로 표현되므로, 결국 풍속 뿐만 아니라 TSR(λ)과 블레이드 피치각(β)에 대하여 비선형적으로 표현된다. 풍력터빈의 동력에 대한 TSR과 출력 계수의 두 가지 중요한 무차원 매개 변수가 있다.

[0076] 도 1은 2MW 풍력터빈의 출력계수를 나타낸 것이다. 출력계수는 본 발명에서 사용된 경우처럼, 도 1에 도시된 바와 같이, TSR과 블레이드 피치각의 함수이며 비선형적인 특성을 가지지만 최대값($C_{p,max}$)을 가지는 한점이 존재함을 알 수 있다. $C_{p,max}$ 가 되게 하는 최적 TSR 값(λ_{opt})과 최적 피치각값(β_{opt})이 존재하는데, 정격 풍속 이하에서는 최대 출력을 생산하기 위하여 블레이드 피치각은 β_{opt} 로 고정한다.

[0077] 앞서 언급한 바와 같이, 바람과 블레이드의 상호작용에 의한 공기역학 토크로 인해 풍력터빈의 전체 거동은 비선형적인 특성을 보인다. 풍속의 크기에 따른 풍력터빈의 동적특성을 파악하고 정밀한 피치제어기의 설계를 위해서는 비선형 공기역학 토크를 선형화(linearization)할 필요가 있다.

[0078] 선형화를 위해서는 동작점(operating points)이 먼저 선정되어야 하는데, 변속 가변 피치 풍력터빈(riable-speed variable-pitch wind turbine)의 경우, 비선형 공기역학 토크의 선형화를 위해서는 동작 풍속(V_0)에 따른 로터 속도와 블레이드 피치각 모두에 대한 동작점인 Ω_{r0} 와 β_0 의 선정이 필요하다.

[0079] 이들 동작점은 수립되는 제어 전략을 바탕으로 풍력터빈의 출력, 로터 속도, 블레이드 피치각의 제한조건 정보들을 고려하여 구하게 된다. 토크제어기의 경우에는 정격 풍속 이하에서 작동하므로 블레이드 피치각의 동작점(β_0)은 최적 피치각(β_{opt})로 고정되지만, 피치제어의 경우에는 정격풍속 이상에서 작동하므로 블레이드 피치각의 동작점은 풍속의 크기에 따라 비선형적으로 커지게 된다.

[0080] 로터속도, 블레이드 피치각, 풍속에 대한 동작점 $O_p = \{\Omega_{r0}, \beta_0, V_0\}$ 근처에서의 로터속도, 블레이드 피치각, 풍속의 변화를 각각 $\delta\Omega_r$, $\delta\beta$, δV 로 두면, 수학식 5의 비선형 공기역학 토크는 이하의 수학식 7과 같이 선형화가 가능하다.

[0081] [수학식 7]

$$T_r = T_{r0} + \delta T_r$$

[0082]

[0083] 수학식 7에서, $T_{r0} = T_r|_{O_p}$ 를 동작점 근처에서의 공기역학 토크로하고, δT_r 를 동작점 근처에서의 공기역학 토크의 변화로 하면 이하의 수학식 8과 같다.

[0084] [수학식 8]

$$\delta T_r = \left. \frac{\partial T_r}{\partial \Omega_r} \right|_{O_p} \cdot \delta \Omega_r + \left. \frac{\partial T_r}{\partial \beta} \right|_{O_p} \cdot \delta \beta + \left. \frac{\partial T_r}{\partial V} \right|_{O_p} \cdot \delta V$$

[0085]

[0086] 정격 풍속 이상에서 작동하는 피치제어기의 특성을 파악하기 위해서는 로터속도와 블레이드 피치각에 대한 공기역학 토크의 변화를 모두 알아야 하므로, 이를 각각 수학식 9와 수학식 10으로 둘 수 있다.

[0087] 또한, 공기역학 토크를 로터속도에 대하여 편미분한 값(N_{Ω_r})은 풍력터빈에 물리적으로 댐핑의 역할을 하므로 (-)부호를 이용하여 표현하였고, 수학식 11과 같이 구해진다. 공기역학 토크를 블레이드 피치각에 대하여 편미분한 값(N_{β_r})은 블레이드 피치각의 변화로 인해 공기역학 토크가 작아지므로 음수의 값을 가지게 되는데, 수학식 5와 수학식 6으로부터 수학식 12와 같이 구할 수 있다.

[0088] [수학식 9]

$$N_{\Omega_r} = - \left. \frac{\partial T_r}{\partial \Omega_r} \right|_{O_p}$$

[0089]

[0090] [수학식 10]

$$N_{\beta_r} = \left. \frac{\partial T_r}{\partial \beta} \right|_{O_p}$$

[0091]

[0092] [수학식 11]

$$N_{\Omega_r} = \frac{\pi \rho R^2}{2} \frac{V_o^3}{\Omega_{ro}^2} \left[C_P(\lambda_o, \beta_o) - \lambda_o \left. \frac{\partial C_P(\lambda, \beta_o)}{\partial \lambda} \right|_{\lambda_o} \right]$$

[0093]

[0094] [수학식 12]

$$N_{\beta_r} = \frac{\pi \rho R^2}{2} \frac{V_o^3}{\Omega_{ro}} \left. \frac{\partial C_P(\lambda_o, \beta)}{\partial \lambda} \right|_{\beta_o}$$

[0095]

[0097] 이하에서는 본 발명에 따른 피치제어기에 대해 설명하도록 한다. 피치제어기는 발전기 속도에 대한 에러를 최소화하고 정상상태에 빨리 도달하도록 하기 위하여 비례 게인(P gain, K_p)과 적분 게인(I, K_i)으로 구성된 PI 제어

기를 고려하게 된다. 또한, PI 게인을 고정된 값으로 사용하면 풍속이 커짐에 따라 N_{β_r} 의 증가로 인해 페루프 피치제어시스템의 고유진동수가 커져서 응답특성이 빨리지는 문제가 발생하는데 이를 방지하고자 풍속의 크기에 따라 피치 PI 게인값을 작게 사용하도록 하는 게인 스케줄러를 사용하게 된다.

[0098] 도 2는 본 발명에 따른 풍력터빈의 페루프 피치제어시스템의 블록도를 도시한 것이다. 도 2에 도시된 바와 같이, 본 발명에 따른 풍속터빈의 페루프 피치제어시스템은 속도제어루프 형태로서 풍력터빈을 위한 피치모델

$G_P(s)$, 피치 PI 제어기 $C_P(s)$, 그리고 피치 게인 스케줄러 $GS(\beta)$ 로 구성되어 있다.

[0099] 피치 PI제어기는 발전기 속도(Ω_g)를 피드백받아 응답인 정격 발전기 속도(Ω_{ref})와의 에러를 줄이기 위하여 블레

이드 피치각을 계산한다. 그리고 풍속이 커짐에 따라 PI 게인값을 줄이기 위한 게인 스케줄러는 풍속의 정보를 이용하는 대신에 블레이드 피치각의 정보를 이용한다.

[0100] 이하에서는 본 발명에 따른 피치 PI 제어기에 대해 설명하도록 한다. 발전기 속도의 동작점(Ω_{go}) 근처에서의 변화를 ($\delta\Omega_g$), 발전기 토크의 동작점(T_{go}) 근처에서의 변화를 δT_g , 블레이드 피치각의 동작점(β_o) 근처에서의 변화를 $\delta\beta$ 로 두고, 수학식 5의 비선형 공기역학 토크를 선형화(linearization)한 결과를 이용하면, 수학식 1의 미분방정식은 이하의 수학식 13과 같이 선형화(linearization)된다.

[0101] [수학식 13]

$$J_{eq}\dot{\delta\Omega_g}(t) + (B_{eq} + B_{\Omega_g})\delta\Omega_g(t) = N_{\beta_g}\delta\beta(t) - T_g(t)$$

[0102]

[0103] 여기서, B_{Ω_g} 와 N_{β_g} 는 이하의 수학식 14와 수학식 15 각각으로 표현된다.

[0104] [수학식 14]

$$B_{\Omega_g} = \frac{N_{\Omega_r}}{N_{gb}^2}$$

[0105]

[0106] [수학식 15]

$$N_{\beta_g} = \frac{N_{\beta_r}}{N_{gb}}$$

[0107]

[0108] 수학식 13의 선형화된 미분방정식으로부터 블레이드 피치각의 변화와 발전기 속도의 변화 사이의 개루프 피치시스템의 선형화된 전달함수를 구하면 이하의 수학식 16과 같다.

[0109] [수학식 16]

$$\delta G_P(s) = \frac{\delta\Omega_g(s)}{\delta\beta(s)} = \frac{N_{\beta_g}}{J_{eq}s + (B_{eq} + B_{\Omega_g})}$$

[0110]

[0111] 본 발명에 따른 피치제어기는 속도 제어루프 제어기 형태의 구조를 가지는데, 수학식 17의 PI 제어기를 적용하여 바람과 블레이드의 상호작용에 의한 공기 역학 토크의 비선형 파라미터인 N_{β_g} 와 B_{Ω_g} 가 페루프 피치제어시스템에 미치는 영향을 확인해 보면, 발전기 속도의 응답과 출력 변화 사이의 페루프 피치제어시스템의 선형화된 전달 함수를 구하면 수학식 18과 같다.

[0112] [수학식 17]

$$C(s) = K_P + \frac{K_I}{s}$$

[0113]

[0114] [수학식 18]

$$\begin{aligned}\delta G_c(s) &= \frac{\delta \Omega_g(s)}{\delta \Omega_{ref}(s)} \\ &= \frac{-N_{\beta_g}(K_P s + K_I)}{J_{eq}s^2 + (B_{eq} + B_{\Omega_g} - K_P N_{\beta_g})s - K_I N_{\beta_g}}\end{aligned}$$

[0115]

[0116] 페루프 피치제어시스템은 2차 시스템(2nd-order system)으로 두 개의 극점(two poles)을 가지는데, 이들 두 개의 극점의 고유진동수(ω_n)와 감쇠비(ζ)를 구하면 수학식 19와 수학식 20과 같다.

[0117] [수학식 19]

$$\omega_n = \sqrt{-\frac{K_I N_{\beta_g}}{J_{eq}}}$$

[0118]

[0119] [수학식 20]

$$\zeta = \frac{B_{eq} + B_{\Omega_g} - K_P N_{\beta_g}}{2\sqrt{J_{eq} K_I N_{\beta_g}}}$$

[0120]

[0121] 이로부터 바람과 블레이드의 상호작용에 의한 의해 결정되는 N_{β_g} 와 B_{Ω_g} 모두는 페루프 피치제어시스템의 두 극점에 영향을 미침을 알 수 있다. B_{Ω_g} 는 감쇠비에만 영향을 주고, N_{β_g} 는 고유진동수와 감쇠비 모두에 영향을 미침을 확인할 수 있다.

[0122] 이하에서는 본 발명에 따른 피치제어 스케줄러에 대해 설명하도록 한다. 페루프 피치제어시스템의 두 극점의 위치는 고유진동수(ω_n)와 감쇠비(ζ)에 의해 결정되며, 이들 두 파라미터는 피치제어시스템의 응답 속도를 결정짓는 주요 요소들이다.

[0123] 특히, N_{β_g} 는 페루프 피치제어시스템의 고유진동수에 매우 큰 영향을 준다. 도 3은 본 발명의 실시예에서 고려된 2MW 풍력터빈에 대한 풍속에 따른 N_{β_g} 의 변화를 나타낸 것이다. 블레이드 피치각이 커지면 공기역학 토크가 줄어들기 때문에 N_{β_g} 의 부호는 (-)이며, 또한 고풍속이 될수록 블레이드 피치각의 변화에 대한 공기역학 토크의 변화가 훨씬 커지게 된다.

[0124] 그러므로 피치 PI 게인을 고정된 값으로 사용하면 풍속이 커질수록 N_{β_g} 의 큰 증가로 인해 페루프 피치제어시스템의 고유진동수가 3배 이상으로 매우 커진다. 이로 인해 응답속도가 빨라질 뿐만 아니라 페루프 피치제어시스템의 대역폭이 넓어져서 동작 트레인(drive-train)의 고유진동수를 가진하여 회전축 진동의 진폭을 키우거나 불안정하게 할 수도 있는 현상이 발생한다. 이런 현상을 방지하고자 피치제어기에서는 게인 스케줄러가 반드시 필요하다.

- [0125] 피치제인 스케줄러에서 제인 스케줄링 방법은 풍속이 커짐에 따라 N_{β_g} 의 절대값이 커짐으로 이의 영향을 줄이기 위해 고풍속 영역에서의 피치 PI 제인값을 작게 사용하는 것이다. 도 4는 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터와 2MW 풍력터빈을 위한 제인 스케줄러의 제인 제수(gain divisor)를 도시한 것이다. 실제 사용하는 방법은 도 4에 도시된 바와 같이, 블레이드 피치각이 커짐에 따라 설계된 피치 PI제인값을 제인 제수(gain divisor)로 나누는 것이다.
- [0127] 이하에서는 본 발명의 실시예에 따른 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터와 2MW 풍력터빈의 피치응답에 대해 설명하도록 한다. 먼저, 본 발명의 실시예에 따른 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터와 2MW 풍력터빈에 대해 설명하도록 한다.
- [0128] 본 발명의 실시예에서는 기어드형 2MW 풍력터빈을 고려한다. 2MW 풍력터빈의 정격풍속은 11.6m/s이고 정격 로터 속도는 18rpm(정격 발전기 속도는 1,500rpm)이고 정격 발전기 토크는 13.4kNm이다. 1 질량 모델에 필요한 물리적 파라미터는 다음과 같다.
- [0129] 로터 반경(R)은 40m이고 기어 박스의 기어비(N_{gb})는 83.33이다. 그리고 로터의 질량 관성 모멘트(J_r)는 $6.209e6\text{kgm}^2$ 이고, 발전기의 질량 관성 모멘트(J_g)는 60kgm^2 이다. 로터의 댐핑값(B_r)은 $0\text{kgm}^2/\text{s}$ 로 설정된다. 수학적 식 1의 1 질량 모델에 대한 등가 질량 모멘트(J_{eq}), 등가 댐핑(B_{eq}), 등가 공기역학 토크(T_g)는 수학적 식 2 내지 4로서 표현된다.
- [0130] 본 발명의 실시예에서 사용된 출력계수(C_p)는 도 1과 같은데, TSR과 블레이드 피치각의 함수이며 앞서 언급한 바와 같이, 최대값($C_{p,max}$)을 가지는 한 점이 존재함을 알 수 있다. $C_{p,max}$ 가 되게 하는 최적 TSR과 최적 피치각의 값을 각각 λ_{opt} 와 β_{opt} 로 두면, 도 1의 경우 $\lambda_{opt} = 8.1$ 이고 $\beta_{opt} = 0^\circ$ 이며 이에 대한 $C_{p,max} = 0.4662$ 이다. 그러므로 정격풍속 이하에서는 최대 출력을 생산하기 위하여 블레이드 피치각은 0° 로 고정한다.
- [0131] 본 발명의 실시예에서는 2MW 풍력터빈의 피치응답을 모사하는 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터를 고려한다. 3.5kW 소형 풍력터빈의 정격풍속은 10.3m/s, 정격 로터 속도는 350rpm(정격 발전기 속도는 1,750rpm)이고 정격 발전기 토크는 95.5Nm이다. 출력계수(C_p)는 도 1에 도시된 바와 같이 2MW 풍력터빈의 경우와 동일하게 사용된다.
- [0132] 도 5는 본 발명의 실시예에 따른 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터를 도시한 것이다. 도 5에 도시된 바와 같이, 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터는 모터, 기어박스, 플라이휠, 및 발전기로 구성될 수 있음을 알 수 있다. 본 발명의 실시예에 따라 설계된 소형 풍력터빈 시뮬레이터는 토크응답 측면에서 2MW 풍력터빈의 응답 속도와 유사한 것을 보여 주었다.
- [0133] 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터에서 기어박스의 기어비 $N_{gbs} = 5$, 로터 반경 $R = 1.95\text{m}$, 플라이휠의 질량 관성 모멘트 $J_{fws} = 1.43\text{kgm}^2$ 이다. 그리고 모터의 질량 관성 모멘트(J_{ms})는 0.04kgm^2 이고, 발전기의 질량 관성 모멘트(J_{gs})는 0.0035kgm^2 이며, 등가 댐핑값(B_{eq})은 $0\text{kgm}^2/\text{s}$ 로 설정된다.
- [0134] 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터의 경우에, 수학적 식 1의 1 질량모델에 대한 등식 질량 모멘트(J_{eq}) 및 동등한 공기 역학적 토크 (T_{eq})는 이하의 수학적 식 21 및 수학적 식 22로 표현될 수 있다. 그리고 R_s 는 수학적 식 5의 공기역학 토크에서 로터반경(R)을 대신하여 적용할 필요가 있다. 결과적으로 설계된 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터는 최적 TSR을 위한 풍속 범위에서 약 9초의 시상수(time constant)를 갖는다.
- [0135] [수학적 식 21]

$$J_{eq} = J_{fws} + J_{gs} + \frac{J_{ms}}{N_{gbs}^2}$$

[0136]

[0137] [수학식 22]

$$T_{eq} = \frac{T_r}{N_{gbs}}$$

[0138]

[0139] 이하에서는 본 발명의 실시예에 따른 피치제어기의 설계방법에 대해 설명하도록 한다. 먼저 피치 PI 제어기의 설계에 대해 설명하도록 한다.

[0140] 본 발명의 실시예에 따른 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터는 정격풍속 이하의 영역에서 실제 2MW 풍력터빈과 유사한 토크 응답속도를 나타내도록 설계 및 제작되었다.

[0141] 본 발명의 실시예에서는 제작된 3.5kW 소형 풍력 시뮬레이터의 피치제어기를 설계하고자 한다. 피치제어기 설계시의 주안점은 정격속도 이상의 영역에서도 실제 2MW 풍력터빈과 유사한 피치응답속도를 나타내도록 하는 것이다.

[0142] 2MW 풍력터빈과 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터의 정격 출력은 다르지만, 페루프 피치제어시스템의 응답 특성은 극점(poles)에 의해 결정되므로 동일한 극점을 가지도록 피치 PI 제어기를 설계하면 피치응답 특성이 서로 상사성을 가지게 될 것이다. 본 발명의 실시예에서는 이점을 고려하여 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터의 피치 PI 제어기를 설계하고자 한다.

[0143] 풍력터빈의 1 질량모델에 피치 PI 제어기를 사용하면 페루프 피치제어시스템은 2차 시스템이 된다. 2차 시스템의 두 극점의 위치는 고유진동수와 감쇠비에 의해 결정되므로, 2MW 풍력터빈과 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터 각각의 페루프 피치제어시스템의 고유진동수와 감쇠비를 동일하게 설계하였다. 2MW 풍력터빈의 정격풍속이 11.6 m/s이므로 피치 PI 제어기를 설계하기 위한 설계풍속은 12 m/s로 두었다. 또한, 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터의 피치 PI 제어기를 설계하기 위한 설계풍속 또한 동일하게 12 m/s로 두었다.

[0144] 피치제어기의 P 게인(K_p)과 I 게인(K_I)의 값들을 결정하기 위해서는 수학식 15의 $N_{\beta_{\xi}}$ 와 수학식 14의 $B_{\Omega_{\xi}}$ 의 값들이 필요하다. $N_{\beta_{\xi}}$ 와 $B_{\Omega_{\xi}}$ 는 비선형 공기역학 토크를 선형화(linearization)하여 블레이드 피치각과 발전기 속도에 대하여 각각 편미분하여 얻은 비선형 파라미터이다.

[0145] 설계풍속 12 m/s에 대하여 2MW 풍력터빈과 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터에서 각각 설계된 피치 PI 제어기의 K_p 와 K_I 값들은 페루프 피치제어시스템의 고유진동수와 감쇠비가 동일하게 되도록 하여 결정하였다. 이때 고유진동수(f_n)는 0.1 Hz로 감쇠비(ζ)는 0.7로 설정하였다.

[0146] 수-MW급 풍력터빈의 피치제어기의 대역폭은 바람의 주파수 특성과 풍력터빈의 타워(tower)와 블레이드와 같은 구조물의 1차 고유진동수 등을 고려하여 약 1 rad/s 이하가 적당한 것으로 알려져 있다. 표 1은 12 m/s 풍속에서 피치 PI제인에 대한 파라미터 값을 나타낸 것이다. 표 1에 나타난 바와 같이, 피치 PI 제어기의 K_p 와 K_I 값들은 수학식 19와 수학식 20으로부터 얻을 수 있다.

표 1

[0147]

Values	2MW wind turbine	3.5kW simulator
f_n (Hz)	0.1	0.1
ζ	0.7	0.7
$J_{eq}(\text{kgm}^2)$	928.2413	1.4351
$B_{eq}(\text{kgm}^2/\text{s})$	0	0
$N_{\beta_{\xi}}$ (Nm/deg)	-490.0125	-1.573
$B_{\Omega_{\xi}}$ (Nms/rad)	39.0701	0.0789

- [0148] 이하에서는 본 발명의 실시예에 따른 피치 게인 스케줄러의 설계에 대해 설명하도록 한다. N_{β_g} 와 B_{Ω_g} 모두는 페루프 피치제어시스템의 두 극점에 영향을 미치는데, N_{β_g} 는 특히 페루프 피치제어시스템의 고유진동수와 응답속도에 매우 큰 영향을 준다.
- [0149] 풍속이 커질수록 N_{β_g} 의 영향이 더 커지므로 풍속이 커짐에 따라 이의 영향을 줄이기 위하여 피치제어기에서는 풍속이 커짐에 따라 K_p 와 K_I 의 값들을 줄여주는 게인 스케줄러의 설계가 필요하다. 본 발명의 실시예에서는 블레이드 피치각이 커짐에 따라 설계된 K_p 와 K_I 의 값들을 게인 제수로 나누는 방법을 적용한다.
- [0150] 도 3은 풍속에 따른 2MW 풍력터빈에 대한 N_{β_g} 의 값 그래프를 도시한 것이다. 즉, 2MW 풍력터빈의 경우 풍속에 따른 N_{β_g} 의 값을 계산하면 도 3과 같은 결과를 얻을 수 있다. 블레이드 피치각이 커지면 공기역학 토크가 줄어들기 때문에 N_{β_g} 의 부호는 (-)이며, 풍속이 커질수록 N_{β_g} 의 절대값이 증가하는 경향을 확인할 수 있다.
- [0151] 2MW 풍력터빈의 게인 제수를 도 4와 같이 피치각을 이용하여 이의 함수로 구현하였다. 피치 게인 스케줄러는 크게 세 가지 구간으로 나눌 수 있다. 도 4에 도시된 바와 같이, 피치각이 $0^\circ \sim 4^\circ$ 인 구간에서는 게인 제수를 1로 고정하고, 피치각이 $4^\circ \sim 30^\circ$ 인 구간에서는 게인 제수는 1에서 3으로 비례적으로 증가한다. 피치각이 $30^\circ \sim 40^\circ$ 인 구간에서는 게인 제수를 3으로 고정한다.
- [0152] 여기서 피치각이 $0^\circ \sim 4^\circ$ 일 때 게인 제수를 1로 정한 이유는 설계풍속인 12 m/s 근처에서는 설계풍속에서 설계한 피치 PI 제어기의 K_p 와 K_I 의 값들을 그대로 사용하기 위해서이다. 그리고 피치각이 $30^\circ \sim 40^\circ$ 일 때 게인 제수를 3으로 고정한 이유는 정지풍속인 24 m/s에서 피치각이 약 30° 이므로 30° 보다 큰 경우에는 게인 제수를 3으로 고정하였기 때문이다.
- [0153] 다음으로 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터의 피치 게인 스케줄러의 설계에 대하여 설명하도록 한다. 도 6은 풍속에 따른 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터에 대한 N_{β_g} 값 그래프를 도시한 것이다. 즉, 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터의 경우 풍속에 따른 N_{β_g} 의 값을 계산하면 도 6과 같은 결과를 얻을 수 있다. 2MW 풍력터빈에 적용한 게인 스케줄러(도 4에 도시된)를 동일하게 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터에 적용하면 페루프 피치제어시스템의 고유 진동수와 감쇠비에서 에러가 크게 발생하게 된다.
- [0154] 이 경우에 에러가 크게 발생하는 이유는 N_{β_g} 의 크기에서 차이가 나기 때문이다. 출력계수가 같은 경우 N_{β_g} 의 값은 로터 반경에 크게 영향을 받는데(수학적식 12에 나타난 바와 같이), 2MW 풍력터빈과 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터의 로터반경은 각각 40 m와 1.95 m로 크게 차이가 난다. 풍속이 12 m/s와 24 m/s에서의 N_{β_g} 의 절대값을 비교해 보면, 2MW 풍력터빈의 경우 약 7배 증가하지만 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터의 경우에는 약 4배만 증가함을 확인할 수 있다.
- [0155] 그러므로 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터의 피치응답속도가 2MW 풍력터빈의 피치응답속도와 유사하기 위해서는 피치 게인 스케줄러를 서로 다르게 사용할 필요가 있다. 본 발명의 실시예에서는 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터의 피치 게인 스케줄러는 정지풍속 근처에서 2MW 풍력터빈의 페루프 피치제어시스템의 고유진동수와 동일하도록 설계하였다.
- [0156] 정지풍속은 24 m/s이지만 2MW 풍력터빈의 경우 N_{β_g} 의 값은 23 m/s와 24 m/s에서 거의 변화가 없으므로 23 m/s의 풍속을 고려하였다. 또한 피치응답특성은 감쇠비 보다 고유진동수에 의한 영향이 크므로 고유진동수를 고려하여 설계하였다. 이와 같은 이유로 $30^\circ \sim 40^\circ$ 일 때의 게인 제수를 1.4로 선정하였다(도 4에 도시된 바와

같이). 이때 23 m/s 풍속에서 고유진동수는 2MW 풍력터빈의 경우와 동일하고, 감쇠비는 1.28 % 정도의 약간의 차이만을 보였다.

[0157] 그리고 3.5kW 소형 풍력터빈 스케줄러의 경우 설계풍속인 12 m/s에서의 피치각은 5.3° 이므로 설계풍속 이상의 영역에서부터 PI 게인값을 줄여주기 위해 PI 게인값을 줄여주는 시작점을 5.3° 보다 약간 큰 6° 로 선정하였다.

[0158] 표 2는 2MW 풍력터빈과 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터의 각 피치제어기에 설계된 게인 스케줄러를 적용한 경우의 페루프 피치제어시스템의 고유진동수와 감쇠비를 비교하여 보여주고 있다.

표 2

[0159]

Wind Speed (m/s)	2MW wind turbine		3.5kW simulator		Error (%)	
	f_n (Hz)	ζ	f_n (Hz)	ζ	f_n	ζ
12	0.1	0.7	0.1	0.7	0	0
13	0.136	0.943	0.116	0.810	14.71	14.10
14	0.142	0.996	0.125	0.886	11.97	11.04
15	0.147	1.045	0.133	0.950	9.52	9.09
16	0.147	1.066	0.139	1.004	5.44	5.82
17	0.154	1.124	0.144	1.053	6.49	6.32
18	0.154	1.145	0.149	1.101	3.25	3.84
19	0.160	1.194	0.154	1.151	3.75	3.60
20	0.159	1.209	0.158	1.194	0.63	1.24
21	0.163	1.252	0.163	1.241	0	0.88
22	0.166	1.292	0.166	1.276	0	1.24
23	0.169	1.330	0.169	1.313	0	1.28

[0160] 피치 PI 게인값의 설정을 위한 설계풍속인 12 m/s에서와 정지풍속 근처인 23 m/s에서는 2개의 페루프 피치제어시스템의 피치제어시스템의 고유진동수 값들은 동일하고 감쇠비 값들은 거의 동일하다. 그러나 고유진동수 값들과 감쇠비 값들에서의 오차는 12~15 m/s 사이의 풍속에서는 약 10~15 % 정도, 15~20 m/s 사이의 풍속에서는 약 1~10 % 정도, 그리고 20 m/s 이상의 고풍속에서는 거의 없음을 알 수 있다. 각 풍속의 크기에 대하여 고유진동수 값에서의 오차가 없도록 게인 제수를 찾아 조금 복잡하게 사용할 수도 있을 것이다. 그러나 본 발명의 실시예에서는 피치 게인 스케줄러의 최적 성능을 찾는 것이 주된 관점이 아니기 때문에, 2MW 풍력터빈의 피치 게인 스케줄러와 같은 형태를 적용하였다.

[0162] 이하에서는 본 발명의 실시예에 따른 피치응답에 대한 수학적 시뮬레이션 결과에 대해 설명하도록 한다. 설계한 피치 PI 제어기와 게인 스케줄러를 적용한 3.5kW 소형 풍력터빈의 피치응답과 2MW 풍력터빈의 피치응답의 상사성(similarity)을 확인하기 위해 세 경우의 계단풍속을 이용하여 응답 특성을 확인하였다.

[0163] 고려된 세 경우의 계단풍속은 정격풍속 이상의 전 풍속영역(12 m/s ~ 24m/s)에서의 피치응답특성을 확인하기 위한 것으로, 10초에서 각각 12 m/s에서 14 m/s로, 16 m/s에서 18 m/s로, 20 m/s에서 22 m/s로 변한다.

[0164] 발전기 속도(Ω_g)와 출력과워(P)에 대한 피치응답을 확인하여 과도응답(transient response)와 정상상태 응답의 특성을 비교하고자 한다. 과도응답에서는 과속도(overspeed)와 과출력(overpower)을 확인하고, 정상상태응답에서는 정착시간(settling time)을 확인하여 정량적으로 분석하였다. 2MW 풍력터빈과 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터의 피치응답을 비교하기 위하여 단위 발전기속도별 및 단위 출력별로 구하였는데, 이들 둘은 각각의 정격 발전기 속도(Ω_{rat})와 정격출력(P_{rat})으로 나누어 정규화한(normalized) 것이다.

[0165] 도 7 내지 도 9는 세 경우의 계단풍속에 대한 각각의 발전기 속도에 대한 피치응답을 비교하여 보여주고, 표 3은 이들 피치응답에 대한 과속도와 과출력과 안정시간에 대한 정량적인 값들을 보여준다.

표 3

Step Wind Speed (m/s)		Ω_g / Ω_{rat}		P / P_{rat}	
		Overspeed (%)	Settling time (s)	Overpower(%)	Settling time (s)
12 to 14	2MW wind turbine	2.08	7.28	2.08	7.28
	3.5kW simulator	2.54	7.09	2.54	7.09
	Error	0.46	0.19	0.46	0.19
16 to 18	2MW wind turbine	1.73	7.63	1.73	7.63
	3.5kW simulator	1.93	7.81	1.93	7.81
	Error	0.2	0.18	0.2	0.18
20 to 22	2MW wind turbine	1.71	8.15	1.71	8.15
	3.5kW simulator	1.76	8.21	1.76	8.21
	Error	0.05	0.06	0.05	0.06

도 7 내지 도 9 및 표 3에 나타난 바와 같이, 풍속이 커질수록 정착시간은 조금씩 길어지고 과속도와 과출력은 둘 다 감소하는 경향을 보여준다.

2MW 풍력터빈의 경우, 정착시간은 약 7.2~8.2초 사이에 있고 그 변화는 1초 정도이고, 과속도와 과출력 모두는 약 1.7~2.1% 사이에 있고 그 변화는 0.4% 정도이다. 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터의 경우, 정착시간은 약 7.1~8.2초 사이에 있고 그 변화는 1초 정도이고, 과속도와 과출력 모두 약 1.8~2.6 % 사이에 있고 그 변화는 0.8 % 정도이다.

20 m/s 이상에서의 고풍속에서는, 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터의 피치응답은 2MW 풍력터빈의 피치응답과 거의 일치하였다. 15~20 m/s 사이의 풍속에서는, 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터의 피치응답은 2MW 풍력터빈의 피치응답 보다 과속도와 과출력이 약 0.2 % 정도 조금 더 컸고 안정시간은 약 0.2초 정도 조금 더 길지만 그 오차가 매우 작았다. 그리고 12~15 m/s 사이의 풍속에서는, 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터의 피치응답은 2MW 풍력터빈의 피치응답보다 과속도와 과출력이 약 0.5 % 정도 더 크고 정착시간은 약 0.2초 정도 조금 더 짧지만 그 오차 또한 매우 작았다.

이는 비록 12~15 m/s 사이의 풍속에서는 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터의 페루프 피치제어시스템의 고유진동수와 감쇠비의 값들이 2MW 풍력터빈의 고유진동수와 감쇠비의 값들보다 약 10~15 % 정도로 작아도, 피치응답의 오차에 미치는 영향은 매우 작음을 보여준다.

앞서 언급한 바와 같이, 본 발명의 실시예에서는 실제 2MW 풍력터빈의 피치응답특성을 모사하는(emulate) 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터의 피치제어기를 설계하여 피치응답의 상사성을 확인하였다.

실제 2MW 풍력터빈의 출력 제어를 위한 수학적 모델로는 1 질량 모델을 고려하였다. 또한, 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터는 모터, 기어박스, 플라이휠, 발전기로 구성된다. 출력제어를 모사(emulate)하기 위하여 필요한 출력계수는 2MW 풍력터빈의 경우와 동일하게 사용하였다.

속도제어루프 형태의 구조를 가지는 피치제어기는 피치 PI 제어기와 피치 게인 스케줄러로 구성되어 있고, 게인 스케줄러는 블레이드 피치각이 커짐에 따라 설계된 피치 PI게인값을 게인 계수로 나누도록 하였다.

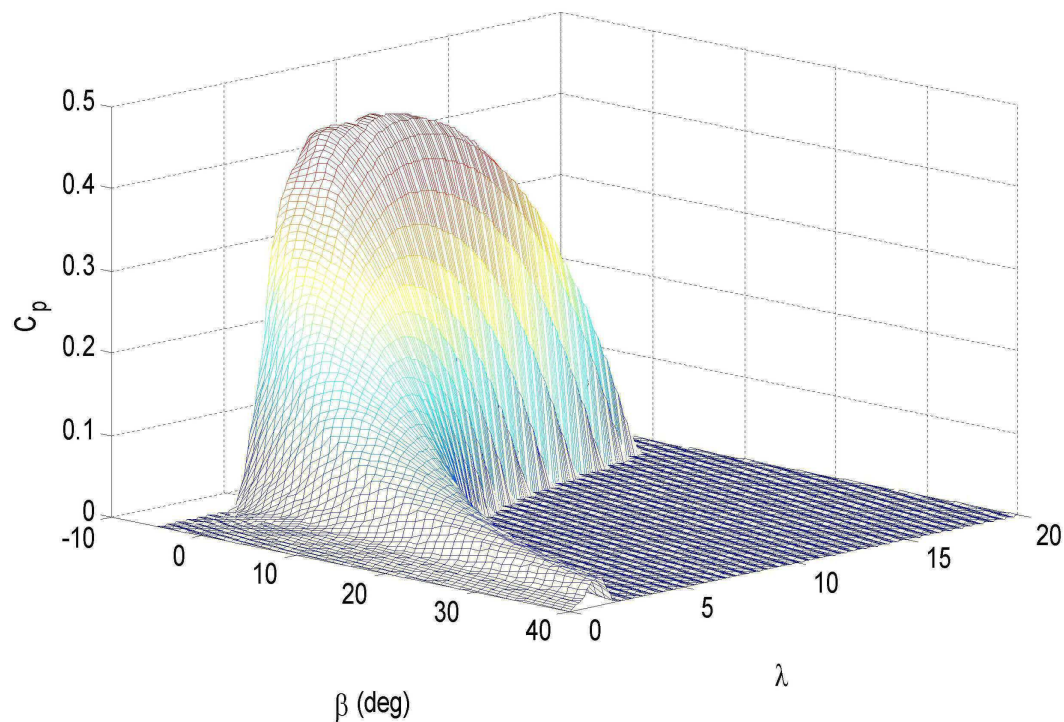
앞서 언급한 바와 같이, 피치 PI 게인값과 게인 스케줄러를 설계하기 위해서는 비선형 공기역학 토크를 선형화가 필요하다. 공기역학 토크를 블레이드 피치각과 로터속도에 대하여 각각 편미분한 두 개의 비선형 파라미터를 구하여, 이 둘이 피치 PI 제어기의 P 게인과 I 게인에 영향을 줌을 확인하였다. 페루프 피치제어시스템은 2차 시스템으로 두 개의 극점을 가지는데, 두 개의 비선형 파라미터 모두 두 개의 극점의 위치를 결정하는 고유진동

수와 감쇠비에 영향을 미침을 확인하였다.

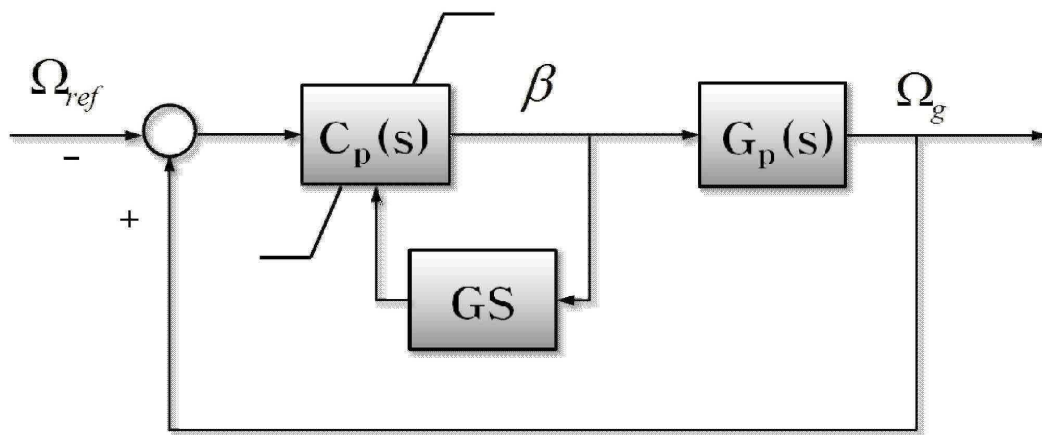
- [0176] 본 발명의 실시예에 따른 피치 PI 게인 값과 게인 스케줄러를 설계하기 위한 방법은 2MW 풍력터빈과 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터 각각의 페루프 피치제어시스템의 고유진동수와 감쇠비를 동일하게 설계하도록 하였다. 피치 PI 제어기의 P 게인값과 I 게인값은 설계풍속은 12 m/s에서 고유진동수는 0.1 Hz이고 감쇠비는 0.7이 되도록 설계하였다.
- [0177] 2MW 풍력터빈에 적용한 게인 스케줄러를 동일하게 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터에 적용하면 페루프 피치제어시스템의 고유진동수와 감쇠비에서 에러가 크게 발생하게 되어, 서로 다른 게인 스케줄러를 사용해야 함을 확인하였다. 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터의 피치 게인 스케줄러는 정지풍속 근처에서 2MW 풍력터빈의 페루프 피치제어시스템의 고유진동수와 동일하도록 설계하였다. 그 결과 30° 보다 큰 피치각에 대하여 2MW 풍력터빈의 경우 게인 제수 값은 3이었으나 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터의 경우 게인 제수값은 1.4로 변경하였다.
- [0178] 정격풍속 이상의 전 풍속영역(12 m/s ~ 24m/s)에서의 피치응답특성을 확인하기 위하여 세 경우의 계단풍속을 고려하여 수학적 시뮬레이션을 수행하여 피치응답의 상사성을 확인하였다. 정착시간에서는 최대 약 0.2초의 오차가 발생하였고, 과속도와 과출력은 최대 0.5%의 오차가 발생하였음을 확인하였다.
- [0179] 이들 오차들이 실제 피치응답에 미치는 영향은 매우 작은 것이다. 그러므로 본 발명의 실시예에 따른 설계 방법을 적용하여 선정된 피치 PI 제어기와 게인 스케줄러를 3.5kW 소형 풍력터빈 시뮬레이터에 적용하면 실제 2MW 풍력터빈과 매우 유사한 피치응답을 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.
- [0181] 또한, 상기와 같이 설명된 장치 및 방법은 상기 설명된 실시예들의 구성과 방법이 한정되게 적용될 수 있는 것이 아니라, 상기 실시예들은 다양한 변형이 이루어질 수 있도록 각 실시예들의 전부 또는 일부가 선택적으로 조합되어 구성될 수도 있다.

도면

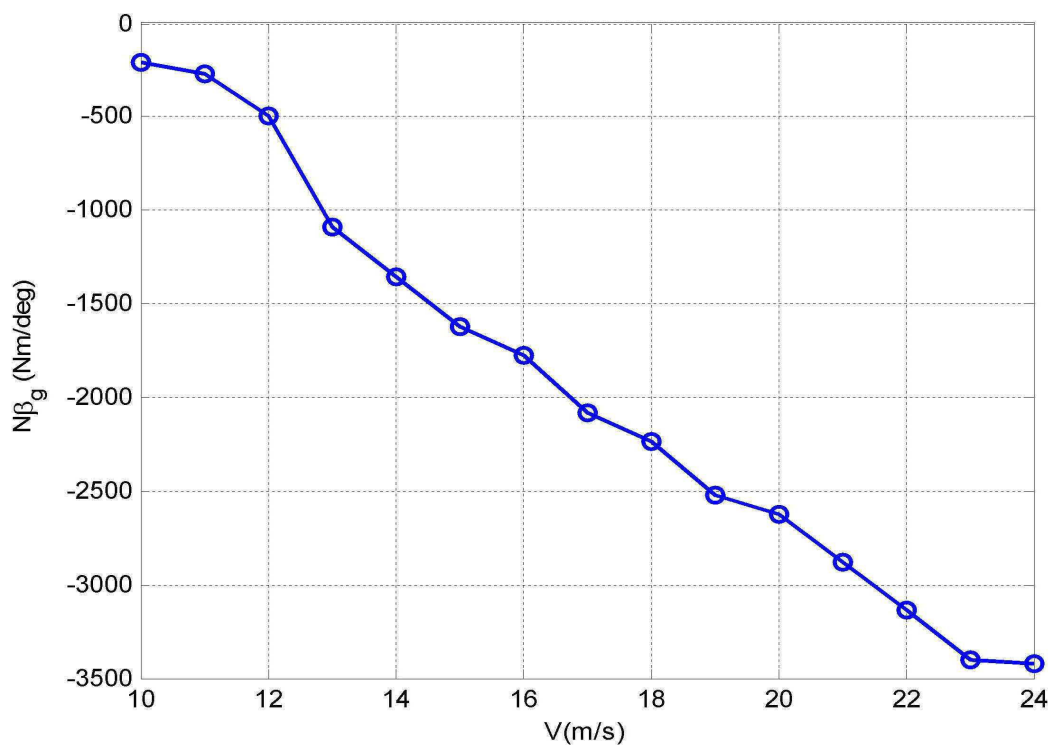
도면1



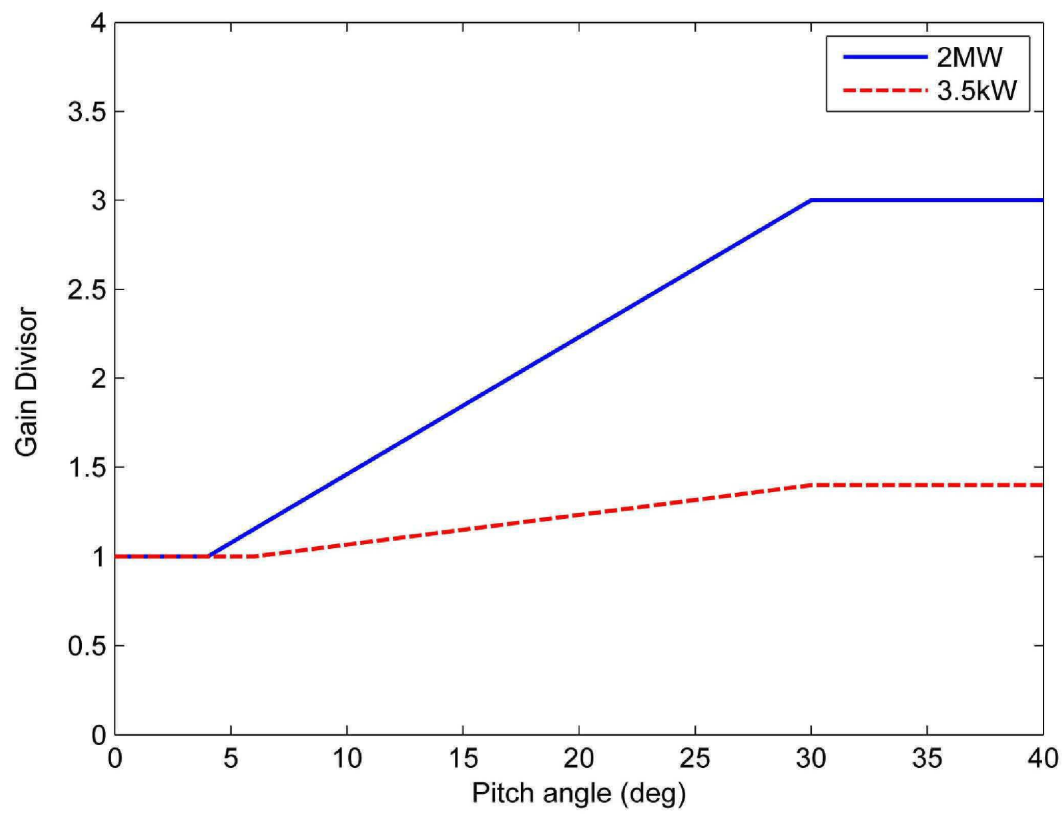
도면2



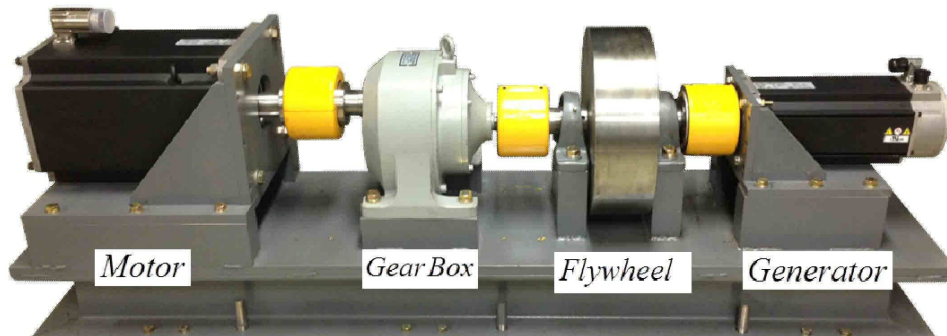
도면3



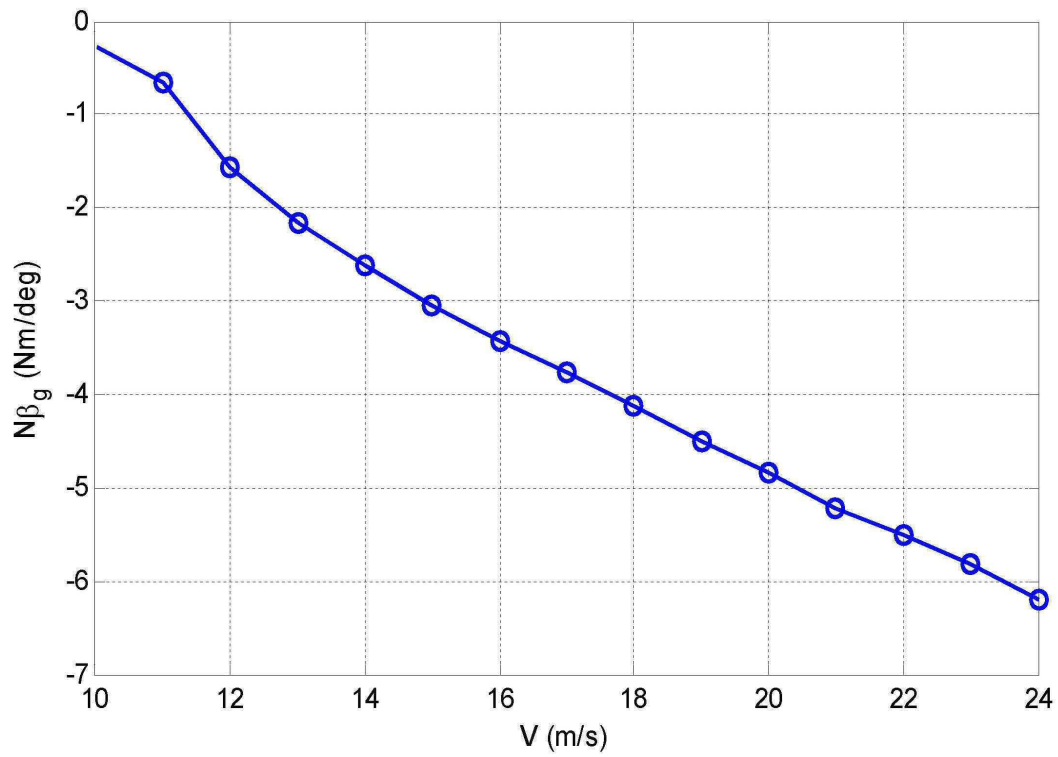
도면4



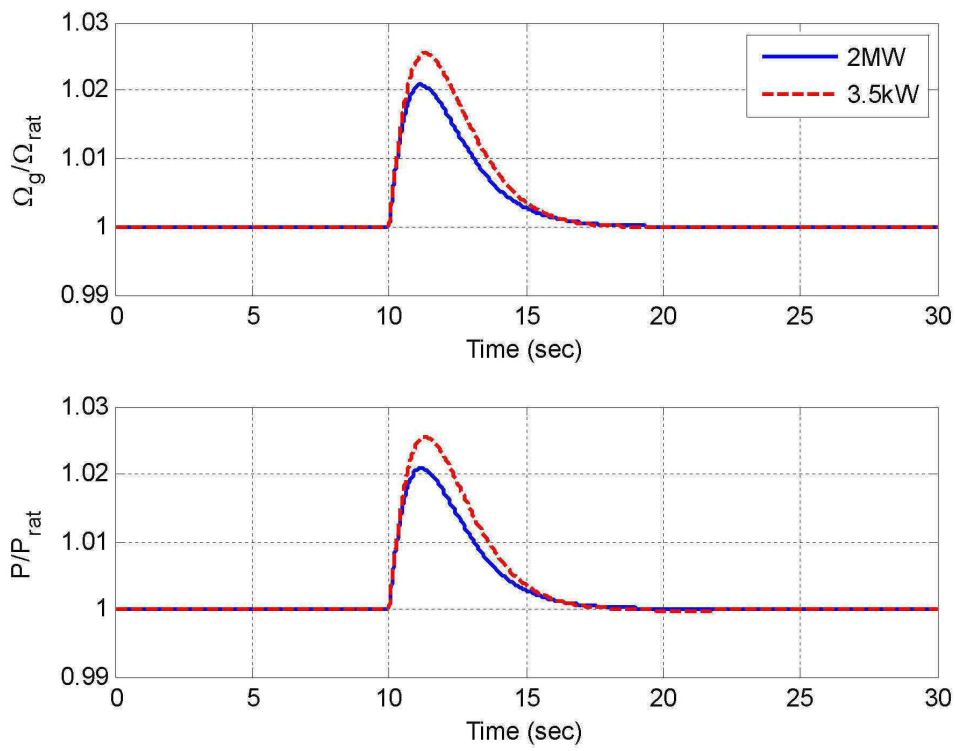
도면5



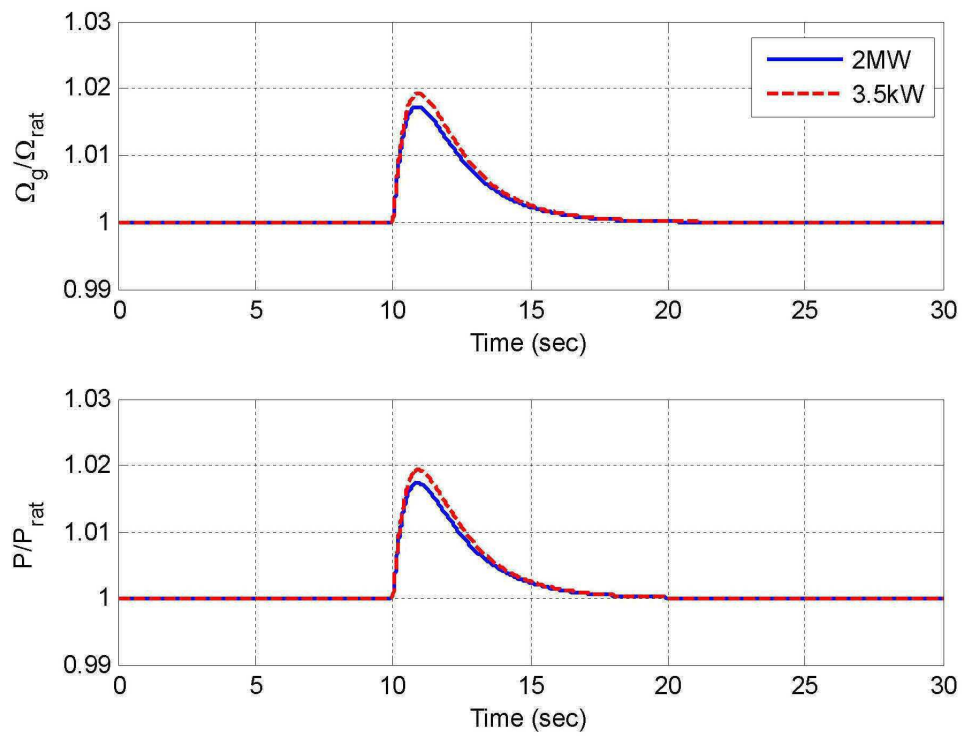
도면6



도면7



도면8



도면9

