(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2016-0066264
(43) 공개일자 2016년06월10일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
F03D 7/04 (2006.01)
(21) 출원번호 10-2014-0170404
(22) 출원일자 2014년12월02일
심사청구일자 2014년12월02일

(71) 출원인
세종대학교산학협력단
서울특별시 광진구 능동로 209 (군자동, 세종대학교)
(72) 발명자
박성수
서울시 마포구 신수로 15, 103동 1501호 (현석동, 강변힐스테이트)
(74) 대리인
유병욱, 한승범

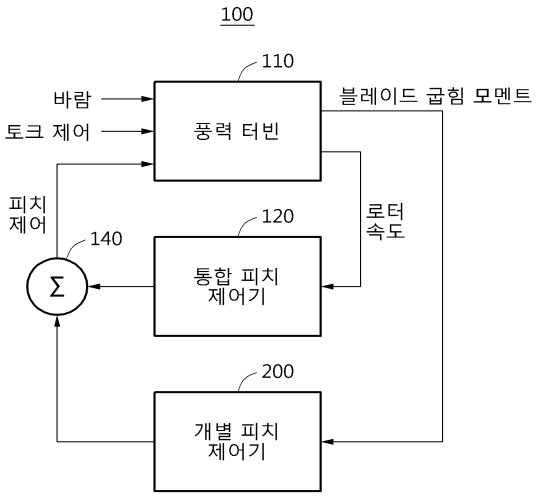
전체 청구항 수 : 총 13 항

(54) 발명의 명칭 **풍력터빈 피치 제어시스템 및 제어방법, 그 방법을 수행하기 위한 프로그램이 기록된 기록매체**

(57) 요 약

본 발명에 따른 풍력터빈 피치 제어시스템은, 다수의 블레이드를 구비한 풍력터빈; 상기 블레이드의 하중 평균을 이용하여 블레이드의 피치를 제어하는 통합피치 제어기; 및 상기 풍력터빈 또는 상기 블레이드의 구조화된 불확실성을 이용하여 블레이드의 피치를 제어하는 개별피치 제어기;를 포함할 수 있다.

대 표 도 - 도1



이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 20110235
부처명 미래창조과학부
연구관리전문기관 한국연구재단
연구사업명 기본연구지원사업
연구과제명 심해상 풍력시스템 제어 및 고장진단 기술 연구
기 여 율 1/1
주관기관 세종대학교 산학협력단
연구기간 2011.05.01 ~ 2016.04.30

명 세 서

청구범위

청구항 1

다수의 블레이드를 구비한 풍력터빈;

상기 블레이드의 하중 평균을 이용하여 블레이드의 피치를 제어하는 통합피치 제어기; 및

상기 풍력터빈 또는 상기 블레이드의 구조화된 불확실성을 이용하여 블레이드의 피치를 제어하는 개별피치 제어기;

를 포함하는 것을 특징으로 하는 풍력터빈 피치 제어시스템.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 개별피치 제어기는,

상기 블레이드의 하중을 측정하는 블레이드 하중 측정부;

상기 풍력터빈의 로터 회전각의 영향을 불확실성으로 간주하여 시불변 모델을 구축하는 시불변 모델 구축부;

상기 풍력터빈의 구조진동의 고차 주파수를 고려하여 가중함수를 설계하는 가중함수 설계부; 및

상기 시불변 모델과 상기 가중함수를 이용하여 개별피치 제어기를 설계하는 개별피치 제어기 설계부;를 포함하는 것을 특징으로 하는 풍력터빈 피치 제어시스템.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 블레이드 하중 측정부는 상기 블레이드의 하중을 측정하여 하중의 평균 및 평균의 편차를 구하고, 상기 하중의 평균을 상기 통합피치 제어기로 보내는 것을 특징으로 하는 풍력터빈 피치 제어시스템.

청구항 4

제3항에 있어서,

상기 시불변 모델 구축부는 상기 편차에 포함된 상기 로터 회전각의 영향을 불확실성의 간주하거나 상기 회전각에 따른 삼각함수의 값을 0으로 간주하는 것을 특징으로 하는 풍력터빈 피치 제어시스템.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 가중함수 설계부는 구조진동이 큰 주파수에 상대적으로 큰 가중치를 부여하는 것을 특징으로 하는 풍력터빈 피치 제어시스템.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 개별피치 제어기 설계부는 뮤 제어기법을 이용하는 것을 특징으로 하는 풍력터빈 피치 제어시스템.

청구항 7

제1항 내지 제6항 중 어느 한 항에 따른 풍력터빈 피치 제어시스템에 의한 제어 방법에 있어서,

상기 블레이드 하중의 평균과 평균의 편차를 구하는 단계;

상기 블레이드의 로터 회전각의 영향을 불확실성으로 간주하여 선형 시불변 모델을 구축하는 단계;

상기 블레이드의 구조진동의 고차 정현파 주파수를 고려하여 가중함수를 설계하는 단계; 및

상기 선형 시불변 모델 및 상기 가중함수를 이용하여 개별피치 제어기를 설계하는 단계;를 포함하는 것을 특징으로 하는 풍력터빈 개별피치 제어방법.

청구항 8

제7항에 있어서,

상기 선형 시불변 모델을 구축하는 단계에서는 로터의 회전각에 따른 삼각함수의 값을 0으로 간주하거나 상기 풍력터빈의 구조화된 불확실성을 이용하는 것을 특징으로 하는 풍력터빈 개별피치 제어방법.

청구항 9

제7항에 있어서,

상기 가중함수를 설계하는 단계에서는 상기 풍력터빈의 구조진동의 가중치가 큰 부분을 최소화하는 것을 특징으로 하는 풍력터빈 개별피치 제어방법.

청구항 10

제7항에 있어서,

상기 가중함수를 설계하는 단계에서는 상기 풍력터빈의 구조진동이 큰 주파수에 상대적으로 큰 가중치를 주는 것을 특징으로 하는 풍력터빈 개별피치 제어방법.

청구항 11

제7항에 있어서,

상기 개별피치 제어기를 설계하는 단계에서는 뮤 제어기 설계 방법을 이용하는 것을 특징으로 하는 풍력터빈 개별피치 제어방법.

청구항 12

제11항에 있어서,

상기 개별피치 제어기를 설계하는 단계에서는 상기 블레이드의 하중 평균과 편차를 구하는 단계에서 얻은 평균 및 편차를 좌표 변환 없이 또는 좌표 변환 전에 상기 뮤 제어기에 적용하는 것을 특징으로 하는 풍력터빈 개별피치 제어방법.

청구항 13

제7항에 기재된 방법을 수행하기 위한 프로그램이 기록된 기록매체.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 풍력터빈 피치 제어시스템 및 제어방법, 그 방법을 수행하기 위한 프로그램이 기록된 기록매체에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 최근 세계적으로 에너지 고갈 및 환경오염을 대비하기 위하여 친환경 신재생 에너지 설치가 증가하면서 대표적인 신 재생 에너지인 풍력발전기의 수요가 증가하고 있는 추세이다.

[0003] 풍력발전기의 궁극적인 목표는 바람에너지를 전기에너지로 변환하여 전기를 생산하는 것으로, 불규칙한 바람을 이용하여 일정한 최대전력을 생산하는 기술이 중요하다. 따라서, 불규칙한 바람의 영향을 제어하기 위해 내부에 다양한 제어기법 및 시스템을 탑재한 가변풍속 풍력발전기가 개발되었다.

[0004] 상기 가변풍속 풍력발전기의 가장 중요한 제어방법이 블레이드의 피치각도를 제어하여 정격속도 이상의 바람이 불 때 일정한 최대 출력을 발생하도록 하는 것이다. 이를 위해 기존의 풍력발전기들은 풍속과 운전 중인 발전기 각속도 값을 입력으로 하고 최대 출력을 발생시키는 발전기 각속도 값을 더하는 구조로 구성된 PI제어기와 리미터를 이용한 블레이드 피치 제어기법을 널리 사용하고 있다. 또한, 신경회로망, 퍼지제어기법 등의 인공지능 기법이 연구되고 있다. 이는 일정한 최대 출력을 목표로 하는 기법으로 풍력발전기의 모든 블레이드의 피치 각을 동일한 값으로 제어하는 즉, 통합 블레이드 피치제어방식을 사용하고 있다.

[0005] 또한, 최근 풍력발전기의 대형화로 인하여 블레이드의 기계적 부하가 증가하게 되면서 풍력발전기의 일정한 최대 출력 뿐만 아니라 풍력발전기 수명증가를 위한 기계적 부하감소가 주된 관심사가 되고 있다. 이를 위해 각각의 블레이드에 기계적 부하를 측정할 수 있는 센서를 설치하고, 상기 센서에서 나오는 실시간 출력 부하값을 이용해 각각의 개별 블레이드 피치각을 제어하는 기법 즉, 블레이드 개별피치 제어방법이 적용되고 있다.

[0006] 더군다나 풍력발전기의 풍력터빈이 대형화되면서 풍전단력(Wind shear) 및 난류강도에 의하여 풍력터빈 블레이드(날개)에 전달되는 풍하중에 편차가 발생되고, 이로 인하여 풍력시스템에 구조진동(structural vibration)이 발생하게 된다. 구조진동은 피로파괴를 일으킬 뿐만 아니라 풍력시스템 성능에 지대한 영향을 미치므로, 이를 보상하기 위한 개별피치제어(IPC, individual pitch control)가 개발되었다.

[0007] 종래의 개별피치제어 방법에는 크게 2가지가 있는데, 첫 번째 방법은 블레이드에 형성되는 기계적 하중이 바람과의 공기역학적 관계에 의하여 결정되는 데 착안하여, 블레이드로 불어오는 바람의 특성, 즉 받음각이나 상대속도 등을 측정하여 개별피치제어를 수행하는 방법이다. 이 방법의 문제점은 블레이드에 공기의 흐름을 측정할 수 있는 피토튜브(pitot tube) 등의 센서를 추가적으로 부착하여야 한다는 점이며 또한 아직 이러한 센서의 신뢰성과 정확성에 문제가 있다는 점이다.

[0008] 두 번째 방법은 도 8에 도시된 바와 같은 블레이드의 3축 방향의 기계적 하중을 측정하고, 좌표 변환을 통하여(MBC, multi-blade coordinate transformation) 고정 좌표계에서의 틸팅(tilting) 및 요잉(yawing) 방향 하중으로 변환하고, 이 하중을 최소화하는 제어명령을 생성한 후, 이를 다시 각 블레이드의 피치각 명령신호로 변환시키는 방법이다. 이 방법은 비교적 측정이 용이한 로터 회전각을 사용한다는 장점이 있으나 센서나 액추에이터 서보에 시간 지연이 생길 경우 안정성에 문제가 생길 수 있고, 또한 고차 정현파동(higher load harmonics)의 진동을 제어하는 경우에는 추가적인 제어루프를 설계해야 하며 이 경우 역시 안정성에 문제가 있을 수 있는 단점이 있다.

[0009] 본 출원인은 위와 같은 종래기술의 문제점을 해결하기 위해 본 발명을 제안하게 되었으며, 종래기술과 관련된 참고문헌으로는 미국등록특허 제7445431호가 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0010] 본 발명은 좌표 변환이 필요 없으며 풍력터빈의 로터 회전각을 측정할 필요가 없는 풍력터빈 피치 제어시스템 및 제어방법, 그 방법을 수행하기 위한 프로그램이 기록된 기록매체를 제공한다.

[0011] 본 발명은 블레이드로 불어 오는 바람의 특성을 측정할 필요가 없는 풍력터빈 피치 제어시스템 및 제어방법, 그 방법을 수행하기 위한 프로그램이 기록된 기록매체를 제공한다.

[0012] 본 발명은 고차 정현파동의 진동에 대해서 추가 제어루프가 필요 없고 단일 제어기를 사용하여 제어할 수 있는 풍력터빈 피치 제어시스템 및 제어방법, 그 방법을 수행하기 위한 프로그램이 기록된 기록매체를 제공한다.

과제의 해결 수단

[0013] 상기한 과제를 달성하기 위한 본 발명에 따른 풍력터빈 피치 제어시스템은, 다수의 블레이드를 구비한 풍력터빈; 상기 블레이드의 하중 평균을 이용하여 블레이드의 피치를 제어하는 통합피치 제어기 및 상기 풍력터빈 또는 상기 블레이드의 구조화된 불확실성을 이용하여 블레이드의 피치를 제어하는 개별피치 제어기;를 포함할 수 있다.

[0014] 상기 개별피치 제어기는, 상기 블레이드의 하중을 측정하는 블레이드 하중 측정부; 상기 풍력터빈의 로터 회전각의 영향을 불확실성으로 간주하여 시불변 모델을 구축하는 시불변 모델 구축부; 상기 풍력터빈의 구조진동의 고차 주파수를 고려하여 가중함수를 설계하는 가중함수 설계부; 및 상기 시불변 모델과 상기 가중함수를 이용하여 개별피치 제어기를 설계하는 개별피치 제어기 설계부;를 포함할 수 있다.

[0015] 상기 블레이드 하중 측정부는 상기 블레이드의 하중을 측정하여 하중의 평균 및 평균의 편차를 구하고, 상기 하중의 평균을 상기 통합피치 제어기로 보낼 수 있다.

[0016] 상기 시불변 모델 구축부는 상기 편차에 포함된 상기 로터 회전각의 영향을 불확실성으로 간주하거나 상기 회전각에 따른 삼각함수의 값을 0으로 간주할 수 있다.

[0017] 상기 가중함수 설계부는 구조진동이 큰 주파수에 상대적으로 큰 가중치를 부여할 수 있다.

[0018] 상기 개별피치 제어기 설계부는 뮤 제어기법을 이용할 수 있다.

[0019] 한편, 발명의 다른 분야에 의하면 본 발명은 풍력터빈 피치 제어시스템에 의한 제어 방법에 있어서, 상기 블레이드 하중의 평균과 평균의 편차를 구하는 단계; 상기 블레이드의 로터 회전각의 영향을 불확실성으로 간주하여 선형 시불변 모델을 구축하는 단계; 상기 블레이드의 구조진동의 고차 정현파 주파수를 고려하여 가중함수를 설계하는 단계; 및 상기 선형 시불변 모델 및 상기 가중함수를 이용하여 개별피치 제어기를 설계하는 단계;를 포함하는 것을 특징으로 하는 풍력터빈 개별피치 제어방법을 제공할 수 있다.

[0020] 상기 선형 시불변 모델을 구축하는 단계에서는 로터의 회전각에 따른 삼각함수의 값을 0으로 간주하거나 상기 풍력터빈의 구조화된 불확실성을 이용할 수 있다.

[0021] 상기 가중함수를 설계하는 단계에서는 상기 풍력터빈의 구조진동의 가중치가 큰 부분을 최소화할 수 있다.

[0022] 상기 가중함수를 설계하는 단계에서는 상기 풍력터빈의 구조진동이 큰 주파수에 상대적으로 큰 가중치를 줄 수 있다.

[0023] 상기 개별피치 제어기를 설계하는 단계에서는 뮤 제어기 설계 방법을 이용할 수 있다.

[0024] 상기 개별피치 제어기를 설계하는 단계에서는 상기 블레이드의 하중 평균과 편차를 구하는 단계에서 얻은 평균 및 편차를 좌표 변환 없이 또는 좌표 변환 전에 상기 뮤 제어기에 적용할 수 있다.

[0025] 본 발명은 풍력터빈 개별피치 제어방법을 수행하기 위한 프로그램이 기록된 기록매체를 제공할 수 있다.

발명의 효과

[0026] 본 발명은 풍력터빈의 구조화된 불확실성을 제외하고 개별피치 제어를 하기 때문에 엑츄에이터 시간지연이 발생하더라도 안전성에 문제가 없다.

[0027] 본 발명은 제어기가 시불변 시스템이기 때문에 안전성을 해석하는데도 용이하다.

[0028] 본 발명은 풍력터빈의 블레이드로 불어오는 바람 및 로터 회전각을 측정할 필요가 없기 때문에 피토튜브, 로터

회전각 측정 센서 등의 센서가 필요하지 않고 이로 인해 제조비용 및 유지비용을 줄 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0029] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 풍력터빈 피치 제어시스템의 구성을 도시한 도면이다.

도 2는 도 1에 따른 제어시스템의 개별피치 제어기의 구성을 도시한 도면이다.

도 3은 도 2에 따른 개별피치 제어기의 시불변 모델 구축부를 도시한 도면이다.

도 4는 도 2에 따른 제어기의 가중함수 설계부를 설계하는 단계를 도시한 도면이다.

도 5는 도 2에 따른 제어기의 개별피치 제어기 설계부를 도시한 도면이다.

도 6은 도 2에 따른 개별피치 제어기를 사용한 경우의 구조 진동 감소를 보여주는 시뮬레이션 그래프이다.

도 7은 도 1에 따른 피치 제어시스템을 사용한 제어방법을 도시한 순서도이다.

도 8은 일반적인 풍력터빈을 도시한 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0030] 이하에서, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명에 따른 실시예들을 상세하게 설명한다. 그러나, 본 발명이 실시예들에 의해 제한되거나 한정되는 것은 아니다. 각 도면에 제시된 동일한 참조 부호는 동일한 부재를 나타낸다.

[0031] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 풍력터빈 피치 제어시스템의 구성을 도시한 도면, 도 2는 도 1에 따른 제어시스템의 개별피치 제어기의 구성을 도시한 도면, 도 3은 도 2에 따른 개별피치 제어기의 시불변 모델 구축부를 도시한 도면, 도 4는 도 2에 따른 제어기의 가중함수 설계부를 설계하는 단계를 도시한 도면, 도 5는 도 2에 따른 제어기의 개별피치 제어기 설계부를 도시한 도면, 도 6은 도 2에 따른 개별피치 제어기를 사용한 경우의 구조 진동 감소를 보여주는 시뮬레이션 그래프, 도 7은 도 1에 따른 피치 제어시스템을 사용한 제어방법을 도시한 순서도이다.

[0032] 도 1 내지 도 7을 참조하면, 본 발명에 따른 풍력터빈 피치 제어시스템(100)은, 다수의 블레이드를 구비한 풍력터빈(110), 상기 블레이드의 하중 평균을 이용하여 블레이드의 피치를 제어하는 통합피치 제어기(120) 및 상기 풍력터빈(110) 또는 상기 블레이드의 구조화된 불확실성을 이용하여 블레이드의 피치를 제어하는 개별피치 제어기(200)를 포함할 수 있다.

[0033] 풍력터빈(110)의 형태는 도 8에 도시된 바와 동일하다.

[0034] 도 1에 도시된 바와 같이, 본 발명에 따른 풍력터빈 피치 제어시스템(100)은 풍력터빈(110)의 블레이드에 불어오는 바람 및 바람에 의해서 블레이드에 발생하는 토크 등을 제어하고, 블레이드에 발생하는 블레이드 굽힘 모멘트(blade bending moment), 로터의 회전속도 등을 이용할 수 있다.

[0035] 통합 피치 제어기(120, collective pitch controller)에 의한 통합 피치 제어와 개별 피치 제어기(200, individual pitch controller)에 의한 개별 피치 제어를 합산하는 가산기(140)에 의해서 최종적인 피치를 제어할 수 있다.

[0036] 한편, 도 2를 참조하면, 상기 개별피치 제어기(200)는, 상기 블레이드의 하중을 측정하는 블레이드 하중 측정부(220), 풍력터빈(110)의 로터(rotor) 회전각의 영향을 불확실성으로 간주하여 시불변 모델(time-invariant model)을 구축하는 시불변 모델 구축부(230), 풍력터빈(110)의 구조진동의 고차 주파수를 고려하여 가중함수(weighting function)를 설계하는 가중함수 설계부(240) 및 상기 시불변 모델과 상기 가중함수를 이용하여 개별피치 제어기를 설계하는 개별피치 제어기 설계부(250)를 포함할 수 있다.

[0037] 블레이드 하중 측정부(210)는 풍력터빈(110)의 상기 블레이드의 하중을 측정하고, 측정된 블레이드 하중의 평균값과, 평균값의 편차를 구한다. 블레이드 하중 측정부(210)는 블레이드 하중의 평균값을 통합피치 제어기(120)로 보내어서 통합피치 제어에 활용할 수 있다. 반면에 블레이드 하중의 평균의 편차는 개별피치 제어기(200)에 보내어서 개별피치 제어에 활용할 수 있다. 이 때, 본 발명에서는 블레이드의 하중 정보에 대한 좌표변환을 적용하지 않은 상태로 개별피치 제어를 수행하는 점에서 종래기술과 차이가 있다.

[0038] 이와 같이, 본 발명에 따른 시스템(100)의 블레이드 하중 측정부(210)에서 얻은 블레이드 하중의 평균값과, 평균값의 편차를 서로 구분하여 각각 통합피치제어와 개별피치제어에 이용한다. 즉, 본 발명에 따른 풍력터빈 피

치 제어시스템(100)은 통합피치제어와 개별피치제어를 분리하여 수행할 수 있다.

[0039] 풍력터빈(110)의 블레이드는 회전하게 되는데 블레이드의 일단이 로터(rotor, 미도시)에 결합되고, 다수의 블레이드(3개의 블레이드가 바람직함)가 바람에 의해서 회전하게 됨으로써 상기 로터도 회전하게 된다. 이 때, 블레이드의 하중 측정값에 로터의 회전각이 영향을 주게 되고, 이러한 로터 회전각의 영향은 하중 평균값의 편차에 포함될 수 있다.

[0040] 개별피치 제어를 함에 있어서 로터의 회전각에 의한 영향이 포함되면 정확한 제어가 어려운 한계가 있다. 본 발명에서는 이를 방지하기 위해서 하중 평균값의 편차에 포함된 로터 회전각의 영향을 불확실성(uncertainty)으로 간주한다.

[0041] 즉, 상기 시불변 모델 구축부(230)에서는 블레이드 하중 평균값의 편차에 포함된 상기 로터 회전각의 영향을 불확실성의 간주하거나 상기 회전각에 따른 삼각함수의 값을 0으로 간주할 수 있다.

[0042] 로터 회전각으로 인한 영향은 풍력터빈(110) 또는 블레이드에 구조화된 불확실성(structured uncertainty)이라고 할 수 있다. 시불변 모델 구축부(230)에서는 로터 또는 블레이드의 방위각(azimuth angle)에 의존하는 풍력터빈 모델계수를 구조적 불확실성으로 간주한다. 한편, 시변 풍력터빈 동역학 방정식은 [수학식 1]과 같이 표현될 수 있다.

수학식 1

[0043]
$$\dot{\mathbf{x}} = A\mathbf{x} + B(\Psi)\mathbf{u} + G(\Psi)\mathbf{d}$$
$$\mathbf{y} = C(\Psi)\mathbf{x} + D\mathbf{u} + F\mathbf{d}$$

[0044] [수학식 1]에서 Ψ은 방위각에 의존하는 파라미터들을 포함하는 시스템 행렬을 의미한다. [수학식 1]에서 $\mathbf{x} = \left[\delta\Omega_r \quad x_{fa} \quad y_{ss} \quad \dot{x}_{fa} \quad \dot{y}_{ss}\right]^T$, $\mathbf{u} = \left[\delta\beta_0 \quad \delta T_g \quad \delta\tilde{\beta}_1 \quad \delta\tilde{\beta}_2 \quad \delta\tilde{\beta}_3\right]^T$, $\mathbf{d} = \left[\delta v_0 \quad \delta\tilde{v}_{0,1} \quad \delta\tilde{v}_{0,2} \quad \delta\tilde{v}_{0,3}\right]^T$, $\mathbf{y} = \left[\delta\Omega_r \quad \delta M_0 \quad \delta\tilde{M}^b_{y,1} \quad \delta\tilde{M}^b_{y,2} \quad \delta\tilde{M}^b_{y,3}\right]^T$ 이다.

[0045] 한편, 상기 [수학식 1]은 통합피치 제어를 위한 수식과 개별피치 제어를 위한 수식으로 나뉘어질 수 있다. 개별피치 제어를 위한 수식에서는 모든 통합피치 관련 변수들을 0으로 가정하는데, 이 수식은 [수학식 2]와 같다.

수학식 2

[0046]
$$\dot{\mathbf{x}} = A\mathbf{x} + B_P(\Psi)\mathbf{u}_P + G_P(\Psi)\mathbf{d}_P$$
$$\mathbf{y}_P = C_P(\Psi)\mathbf{x} + D_P\mathbf{u}_P + F_P\mathbf{d}_P$$

[0047] [수학식 2]에서 $\mathbf{u}_P = \left[\delta\tilde{\beta}_1 \quad \delta\tilde{\beta}_2 \quad \delta\tilde{\beta}_3\right]^T$, $\mathbf{d}_P = \left[\delta\tilde{v}_{0,1} \quad \delta\tilde{v}_{0,2} \quad \delta\tilde{v}_{0,3}\right]^T$, $\mathbf{y}_P = \left[\delta\tilde{M}^b_{y,1} \quad \delta\tilde{M}^b_{y,2} \quad \delta\tilde{M}^b_{y,3}\right]^T$ 이다.

[0048] [수학식 2]에서 방위각에 의존하는 시스템 행렬은 [수학식 3]과 같이 표현될 수 있다.

수학식 3

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \mathbf{y}_P \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} A & G_0 & B_0 \\ C_0 & F_P & D_P \end{bmatrix} + \sum_{i=1}^{3} \cos\Psi_i \begin{bmatrix} 0 & G_i & B_i \\ C_i & 0 & 0 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{d}_P \\ \mathbf{u}_P \end{bmatrix}$$

[0049]

[0050] [수학식 3]에서 B_0, C_0, G_0는 명목행렬(nominal matrices), B_i, C_i, G_i는 방위각에 의존하는 계수를 포함하는 행렬을 의미한다. 본 발명에서는 다중 블레이드 좌표 변환(multi-blade coordinate transformation)이 필요 없고, 방위각을 불확실성(δ_i)으로 간주하고, $-1 \leq \delta_i \leq 1$이다.

[0051] 아래 [수학식 4]의 상태 방정식에 의해서 여분 입력 및 출력을 가지는 선형 시스템(G_{ss})을 정의할 수 있다.

수학식 4

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \mathbf{z}_1 \\ \mathbf{z}_2 \\ \mathbf{z}_3 \\ \mathbf{y}_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & E_1 & E_2 & E_3 & G_0 & B_0 \\ G_1 & 0 & 0 & 0 & H_{11} & H_{12} \\ G_2 & 0 & 0 & 0 & H_{21} & H_{22} \\ G_3 & 0 & 0 & 0 & H_{31} & H_{32} \\ C_0 & F_1 & F_2 & F_3 & F_P & D_P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{w}_1 \\ \mathbf{w}_2 \\ \mathbf{w}_3 \\ \mathbf{d}_P \\ \mathbf{u}_P \end{bmatrix}$$

[0052]

[0053] 도 3에는 본 발명에 따른 풍력터빈(110)의 로터 회전각의 영향을 불확실성으로 간주하여 선형 시불변 모델을 구축하는 단계를 도시하는 그림이다. 도 3에 도시된 불확실성 모델은 [수학식 5]와 같이 선형시스템(G_{ss})에 대한 upper LFT(linear fractional transformation)으로 표현될 수 있다.

수학식 5

$$\mathbf{y}_P = F_U(G_{SS}, \Delta_S) \begin{bmatrix} \mathbf{d}_P \\ \mathbf{u}_P \end{bmatrix}$$

[0054]

[0055] [수학식 5]에서 Fu는 upper LFT, dP는 풍속변동(wind speed fluctuation), yP는 블레이드 굽힘 모멘트 변동(blade bending moment fluctuation), G_{ss}는 명목행렬(nominal matrices)을 포함하는 확대된 선형 시스템(linear system), Δs는 $Zs=[Z_1\ Z_2\ Z_3]^T$를 $Ws=[W_1\ W_2\ W_3]^T$로 매핑(map)하는 것으로, 구조적 불확실성(structured uncertainty)을 표현한다. Δs는 다음 [수학식 6]과 같은 구조를 가진다.

수학식 6

$$\Delta_S = \begin{bmatrix} \delta_1 I_3 & 0 & 0 \\ 0 & \delta_2 I_3 & 0 \\ 0 & 0 & \delta_3 I_3 \end{bmatrix}$$

[0056]

[0057] [수학식 6]에서 I_3는 3×3의 행렬을 의미한다.

[0058] 시불변 모델 구축부(230)에서 편차에 포함된 로터 회전각의 영향을 불확실성으로 간주하여 선형 시불변 모델을 구축하기 때문에 로터의 회전각을 측정할 필요가 없고 고정좌표계로의 변환도 필요 없으며, 좌표변환이 필요 없기 때문에 로터 또는 블레이드의 방위각(azimuth angle)이 필요하지 않다. 또한, 액츄에이터의 시간지연에도 안정성을 잃지 않게 된다.

[0059] 한편, 본 발명에 따른 개별피치 제어기(200)의 가중함수 설계부(240)는 풍력터빈(110) 또는 로터나 블레이드에 발생하는 구조진동의 주 주파수와 고차 정현파 주파수를 고려하여 가중함수(weighting function)를 설계할 수 있다. 즉, 구조진동이 큰 주파수에 상대적으로 큰 가중치를 부여할 수 있다. 이 때, 가중치가 큰 부분을 최소화하는 것이 바람직하다.

[0060] 구조진동의 고차 정현파 주파수를 고려하여 가중함수($W_\beta(s)$)를 설계하기 때문에 고차 정현파동의 진동에 대해서 추가적인 루프를 설계할 필요가 없으며 단일의 제어기를 사용하여 안정적으로 제어할 수 있다.

[0061] 도 4에는 가중함수(weighting function)을 설계하는 단계가 도시되어 있다. 즉, 도 4에는 도 5에 도시된 뮤 제어기 블록 다이어그램(μ-synthesis block diagram)에 사용된 가중함수의 주파수 응답 크기를 보여주는 도면이다. 도 4에서 W_β, W_V, W_M 모두 가중함수이다.

[0062] 본 발명에 따른 개별피치 제어기(200)의 개별피치 제어기 설계부(250)는 선형 시불변 모델과 가중함수를 이용하여 뮤 제어기 설계 방법을 이용하여 개별피치 제어기(200)를 설계할 수 있다. 뮤 제어기(μ-synthesis)의 특성상 산출된 개별피치 제어기는 시불변 시스템이 되며 안정성도 함께 확보될 수 있다. 이와 같이, 개별피치 제어기 설계부(250)는 뮤 제어기법을 이용할 수 있다.

[0063] 도 5는 뮤 제어기 설계 방법(μ-synthesis)을 이용하여 개별피치제어기(200)를 설계할 때에 대상 모델을 예시적으로 도시한 도면이다. 도 5에 도시된 다이어그램에서 점선으로 둘러싸인 부분이 제어모델(또는 통합모델, synthesis model)이며 P로 표시한다.

[0064] 상기와 같이 구성된 개별피치 제어기(200)를 적용하면 도 6에 도시된 바와 같이 구조진동을 획기적으로 줄일 수 있다. 도 6에는 본 발명에 따른 개별피치 제어기(200)를 사용하여 풍력터빈(110)의 블레이드에 대한 개별피치 제어를 할 경우에 블레이드 굽힘 모멘트(blade bending moments, $M^b_{y,1}$, $M^b_{y,2}$, $M^b_{y,3}$)의 응답을 보여주는 그래프이다. 도 6의 (a)는 통합피치제어를 할 경우의 블레이드 굽힘 모멘트 응답이고, 도 6의 (b)는 본 발명에 따른 개별피치제어를 할 경우의 블레이드 굽힘 모멘트 응답을 보여주는 그래프이다. 양자를 비교해 보면, 도 6의 (b)가 (a)에 비해서 블레이드 하중 오실레이션(blade load oscillation)이 현저히 감소된 것을 알 수 있다.

[0065] 본 발명에 따른 개별피치 제어기(200)는 블레이드 하중 측정부(210)의 측정값을 계산하고 평균 및 편차를 구분하여 통합피치제어 및 개별피치제어에 사용하게 하고, 시불변 모델 구축부(230), 가중함수 설계부(240) 및 개별피치 제어기 설계부(250)와 연동하고 이들의 기능을 제어하고 통합하는 별도의 제어부(210)를 더 포함할 수도 있다.

[0066] 한편, 도 7에 도시된 바와 같이, 발명의 다른 분야에 의하면 본 발명은 풍력터빈 피치 제어시스템(100)에 의한 제어 방법에 있어서, 상기 블레이드 하중의 평균과 평균의 편차를 구하는 단계(1100), 상기 블레이드의 로터 회전각의 영향을 불확실성으로 간주하여 선형 시불변 모델을 구축하는 단계(1200), 상기 블레이드의 구조진동의 고차 정현파 주파수를 고려하여 가중함수를 설계하는 단계(1300) 및 상기 선형 시불변 모델 및 상기 가중함수를 이용하여 개별피치 제어기를 설계하는 단계(1400)를 포함하는 것을 특징으로 하는 풍력터빈 개별피치 제어방법을 제공할 수 있다.

[0067] 상기 블레이드 하중의 평균과 평균의 편차를 구하는 단계(1100)에서는 블레이드 하중 측정부(210)에 의해서 풍력터빈(110)의 상기 블레이드의 하중을 측정하고, 측정된 블레이드 하중의 평균값과, 평균값의 편차를 구한다. 블레이드 하중 측정부(210)는 블레이드 하중의 평균값을 통합피치 제어기(120)로 보내어서 통합피치 제어에 활용할 수 있다. 반면에 블레이드 하중의 평균의 편차는 개별피치 제어기(200)에 보내어서 개별피치 제어에 활용할 수 있다.

[0068] 상기 선형 시불변 모델을 구축하는 단계(1200)에서는 로터의 회전각에 따른 삼각함수의 값을 0으로 간주하거나 상기 풍력터빈의 구조화된 불확실성을 이용할 수 있다. 선형 시불변 모델을 구축하는 단계(1200)에서는 시불변 모델 구축부(230)에 의해서 로터 또는 블레이드의 방위각(azimuth angle)에 의존하는 풍력터빈 모델계수를 구조

적 불확실성으로 간주할 수 있다. 이러한 과정을 거침으로써, 하중 평균값의 편차에 포함된 로터 회전각의 영향을 불확실성으로 간주하여 선형 시불변 모델을 구축하기 때문에 로터의 회전각을 측정할 필요가 없고 고정좌표계로의 변환도 필요 없으며, 좌표변환이 필요 없기 때문에 로터 또는 블레이드의 방위각(azimuth angle)이 필요하지 않다. 또한, 액츄에이터의 시간지연에도 안정성을 잃지 않게 된다.

[0069] 상기 가중함수를 설계하는 단계(1300)에서는 상기 풍력터빈(110)의 구조진동의 가중치가 큰 부분을 최소화할 수 있다. 즉, 상기 가중함수를 설계하는 단계(1300)에서는 상기 풍력터빈(110)의 구조진동이 큰 주파수에 상대적으로 큰 가중치를 줄 수 있다. 가중함수를 설계하는 단계(1300)에서는 가중함수 설계부(240)에 의해서 풍력터빈(110) 또는 로터나 블레이드에 발생하는 구조진동의 주 주파수와 고차 정현파 주파수를 고려하여 가중함수(weighting function)를 설계할 수 있다. 즉, 구조진동이 큰 주파수에 상대적으로 큰 가중치를 부여할 수 있다. 이 때, 가중치가 큰 부분을 최소화하는 것이 바람직하다. 이와 같이, 구조진동의 고차 정현파 주파수를 고려하여 가중함수($W_\beta(s)$)를 설계하기 때문에 고차 정현파동의 진동에 대해서 추가적인 루프를 설계할 필요가 없으며 단일의 제어기를 사용하여 안정적으로 제어할 수 있다.

[0070] 상기 개별피치 제어기(200)를 설계하는 단계(1400)에서는 뮤 제어기 설계 방법(μ-synthesis)을 이용할 수 있다. 즉, 개별피치 제어기 설계부(250)에 의해서 선형 시불변 모델과 가중함수를 이용하여 뮤 제어기 설계 방법을 이용하여 개별피치 제어기(200)를 설계할 수 있다. 뮤 제어기(μ-synthesis)의 특성상 산출된 개별피치 제어기는 시불변 시스템이 되며 안정성도 함께 확보될 수 있다.

[0071] 개별피치 제어기(200)를 설계하는 단계(1400)에서는 상기 블레이드의 하중 평균과 편차를 구하는 단계에서 얻은 평균 및 편차를 좌표 변환 없이 또는 좌표 변환 전에 상기 뮤 제어기에 적용할 수 있다.

[0072] 이와 같이, 본 발명은 풍력터빈(100) 피치 제어시스템에 의한 제어 방법으로서 상기 로터 회전각에 따른 정현파 값 또는 상기 풍력터빈의 구조화된 불확실성을 제외하여 블레이드의 피치를 개별적으로 제어하는 것을 특징으로 하는 풍력터빈 개별피치 제어방법을 제공할 수 있다.

[0073] 한편, 본 발명은 풍력터빈 개별피치 제어방법을 수행하기 위한 프로그램이 기록된 기록매체를 제공할 수 있다. 본 발명의 실시예들은 다양한 컴퓨터로 구현되는 동작을 수행하기 위한 프로그램 명령을 포함하는 컴퓨터 판독 가능 매체를 포함한다. 상기 컴퓨터 판독 가능 매체는 프로그램 명령, 로컬 데이터 파일, 로컬 데이터 구조 등을 단독으로 또는 조합하여 포함할 수 있다. 상기 매체는 본 발명을 위하여 특별히 설계되고 구성된 것들이거나 컴퓨터 소프트웨어 당업자에게 공지되어 사용 가능한 것일 수도 있다. 컴퓨터 판독 가능 기록 매체의 예에는 하드 디스크, 플로피 디스크 및 자기 테이프와 같은 자기 매체, CD-ROM, DVD와 같은 광기록 매체, 플롭티컬 디스크와 같은 자기-광 매체, 및 롬, 램, 플래시 메모리 등과 같은 프로그램 명령을 저장하고 수행하도록 특별히 구성된 하드웨어 장치가 포함된다. 프로그램 명령의 예에는 컴파일러에 의해 만들어지는 것과 같은 기계어 코드뿐만 아니라 인터프리터 등을 사용해서 컴퓨터에 의해서 실행될 수 있는 고급 언어 코드를 포함한다.

[0074] 이상과 같이 본 발명의 일 실시예에서는 구체적인 구성 요소 등과 같은 특정 사항들과 한정된 실시예 및 도면에 의해 설명되었으나 이는 본 발명의 보다 전반적인 이해를 돕기 위해서 제공된 것일 뿐, 본 발명은 상기의 실시예에 한정되는 것은 아니며, 본 발명이 속하는 분야에서 통상적인 지식을 가진 자라면 이러한 기재로부터 다양한 수정 및 변형이 가능하다. 따라서, 본 발명의 사상은 설명된 실시예에 국한되어 정해져서는 아니 되며, 후술하는 특허청구범위뿐 아니라 이 특허청구범위와 균등하거나 등가적 변형이 있는 모든 것들은 본 발명 사상의 범주에 속한다고 할 것이다.

부호의 설명

[0075] 100: 풍력터빈 피치 제어시스템 110: 풍력터빈

120: 통합피치 제어기 200: 개별피치 제어기

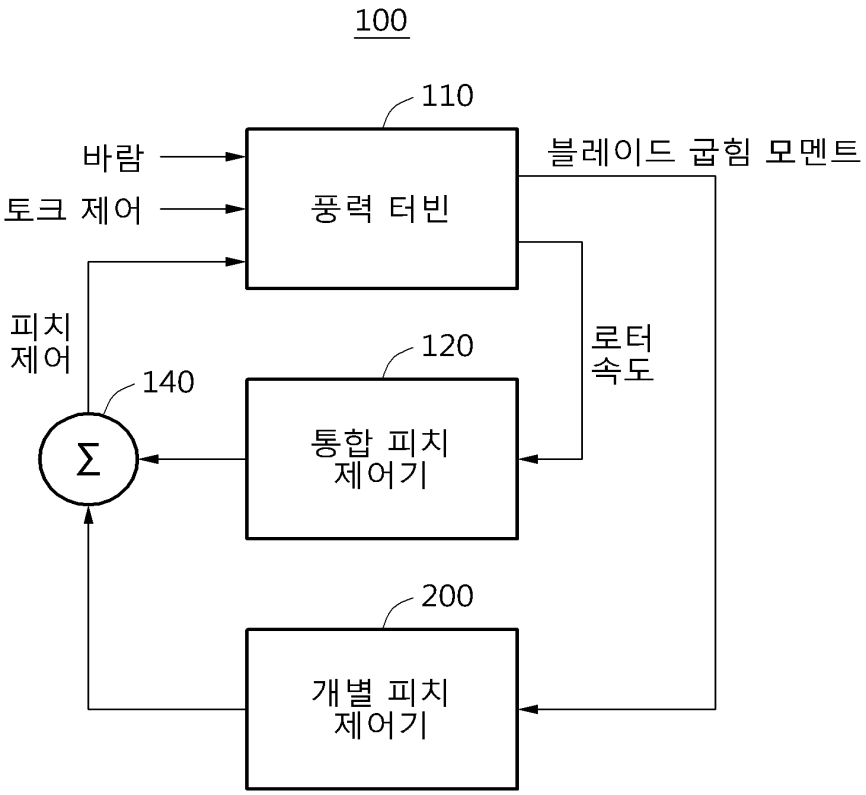
210: 제어부 220: 블레이드 하중 측정부

230: 시불변 모델 구축부 240: 가중함수 설계부

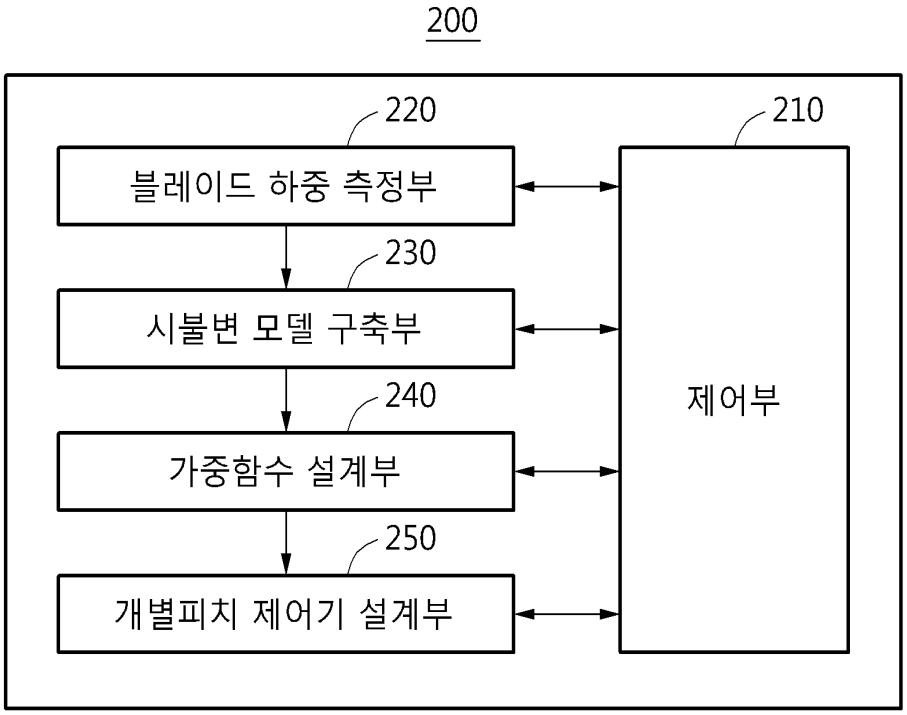
250: 개별피치 제어기 설계부

도면

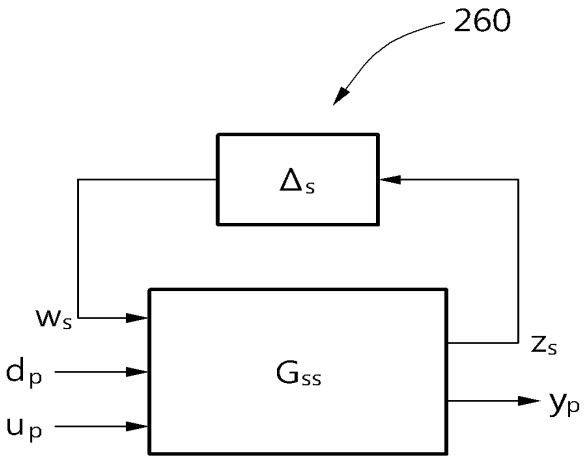
도면1


100
110
바람
토크 제어
풍력 터빈
블레이드 굽힘 모멘트
피치
제어
140
Σ
120
통합 피치
제어기
로터
속도
200
개별 피치
제어기

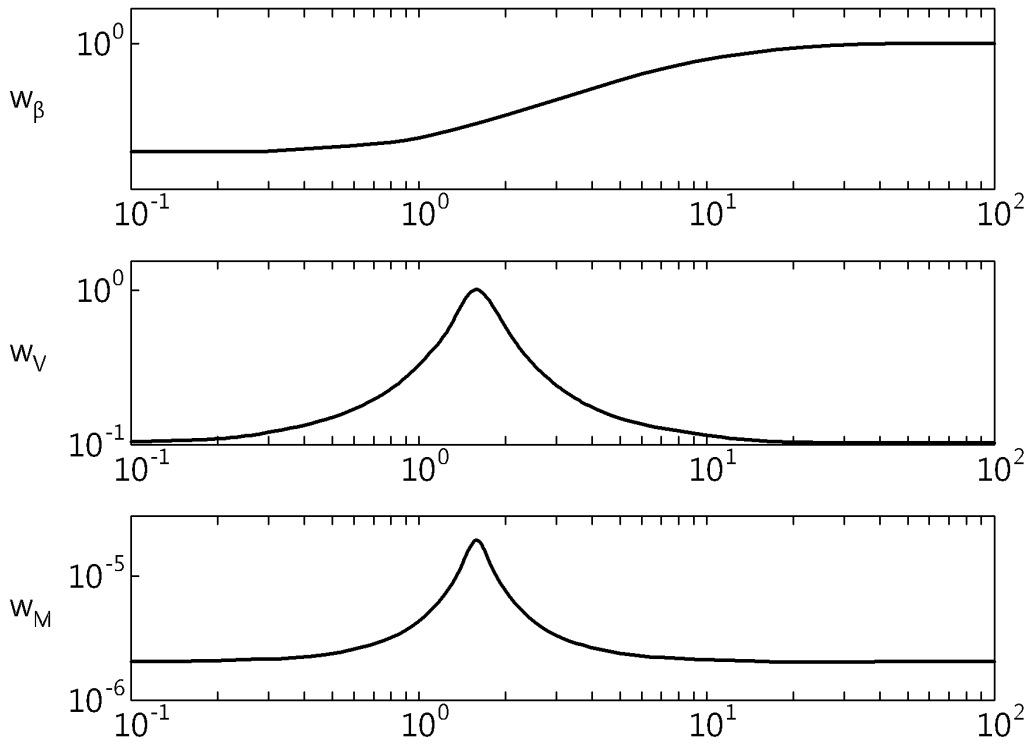
도면2


200
220
210
블레이드 하중 측정부
230
시불변 모델 구축부
240
가중함수 설계부
250
개별피치 제어기 설계부
제어부

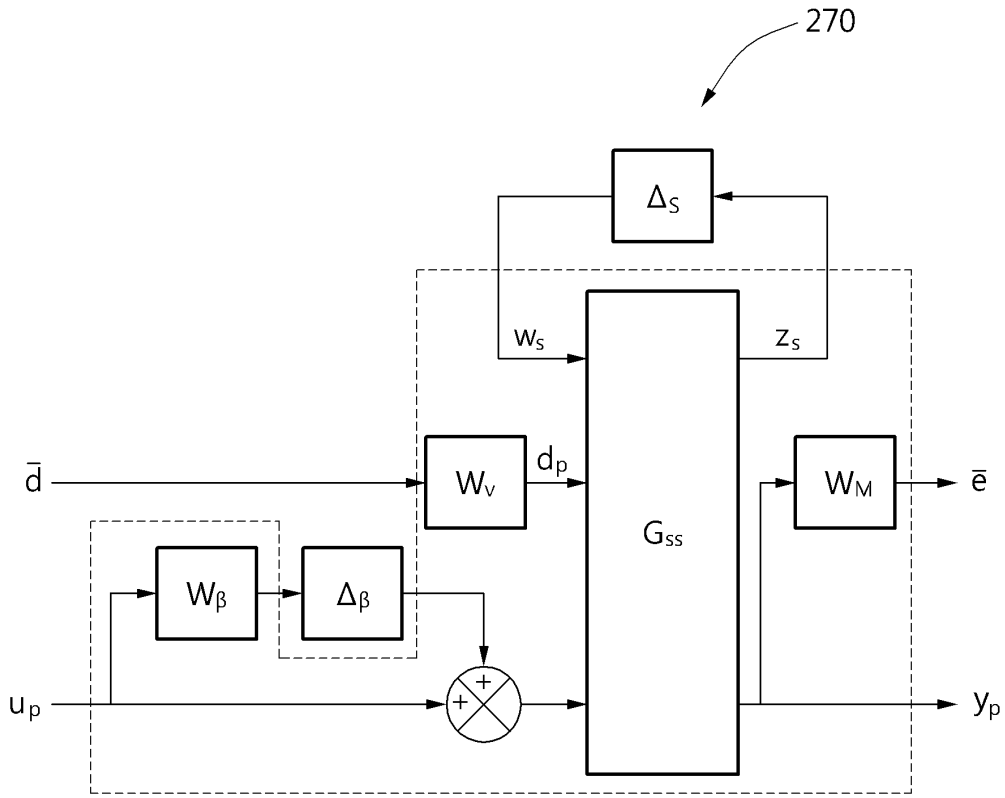
도면3


260
Δs
ws
dp
up
Gss
zs
yp

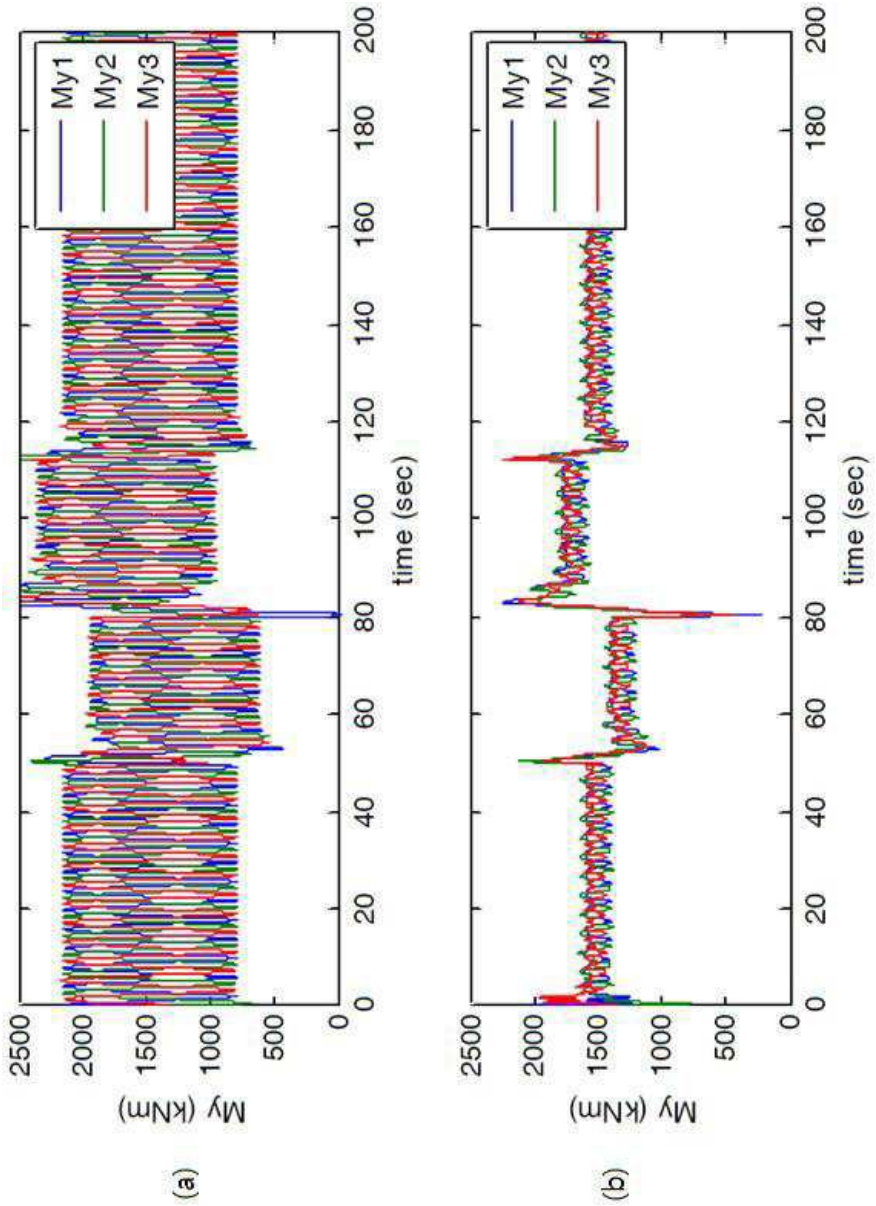
도면4


w_β
10^0
10^{-1}
10^0
10^1
10^2
w_V
10^0
10^{-1}
10^{-1}
10^0
10^1
10^2
w_M
10^{-5}
10^{-6}
10^{-1}
10^0
10^1
10^2

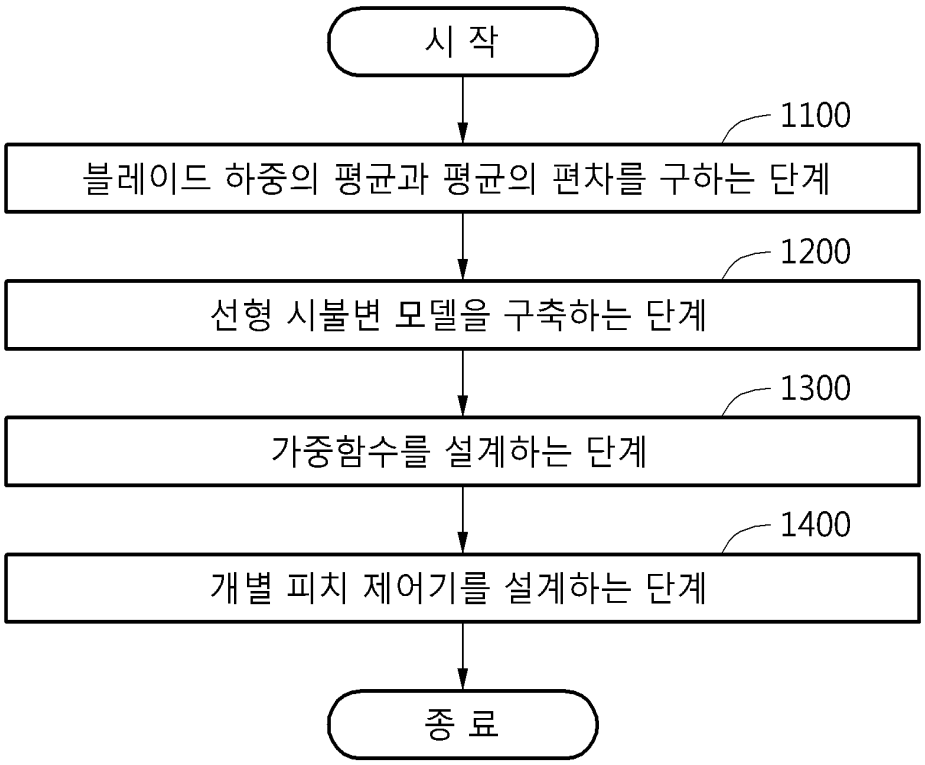
도면5


270
Δ_S
w_s
z_s
$\bar{d}$
W_v
d_p
G_{ss}
W_M
$\bar{e}$
W_β
Δ_β
+
+
u_p
y_p

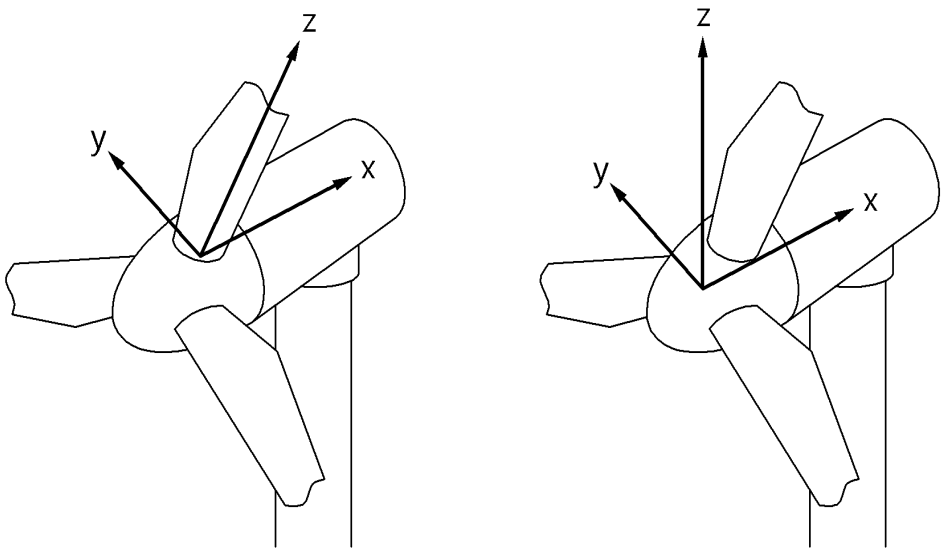
도면6



도면7


시 작
1100
블레이드 하중의 평균과 평균의 편차를 구하는 단계
1200
선형 시불변 모델을 구축하는 단계
1300
가중함수를 설계하는 단계
1400
개별 피치 제어기를 설계하는 단계
종 료

도면8


z
y
x
z
y
x

(a) (b)