



(19) 대한민국특허청(KR)

(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2021년03월17일

(11) 등록번호 10-2228727

(24) 등록일자 2021년03월11일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

F03D 7/02 (2006.01)

(52) CPC특허분류

F03D 7/0224 (2013.01)

F05B 2270/326 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2020-0149426

(22) 출원일자 2020년11월10일

심사청구일자 2020년11월10일

(56) 선행기술조사문헌

EP02447527 A1

JP2014163312 A

KR1020180011408 A

WO2013182204 A1

(73) 특허권자

한밭대학교 산학협력단

대전광역시 유성구 동서대로 125 (덕명동)

(72) 발명자

임채욱

대전광역시 서구 월평동로 83, 다모아아파트 11  
0동 1506호

(74) 대리인

특허법인 아이퍼스

전체 청구항 수 : 총 14 항

심사관 : 박종오

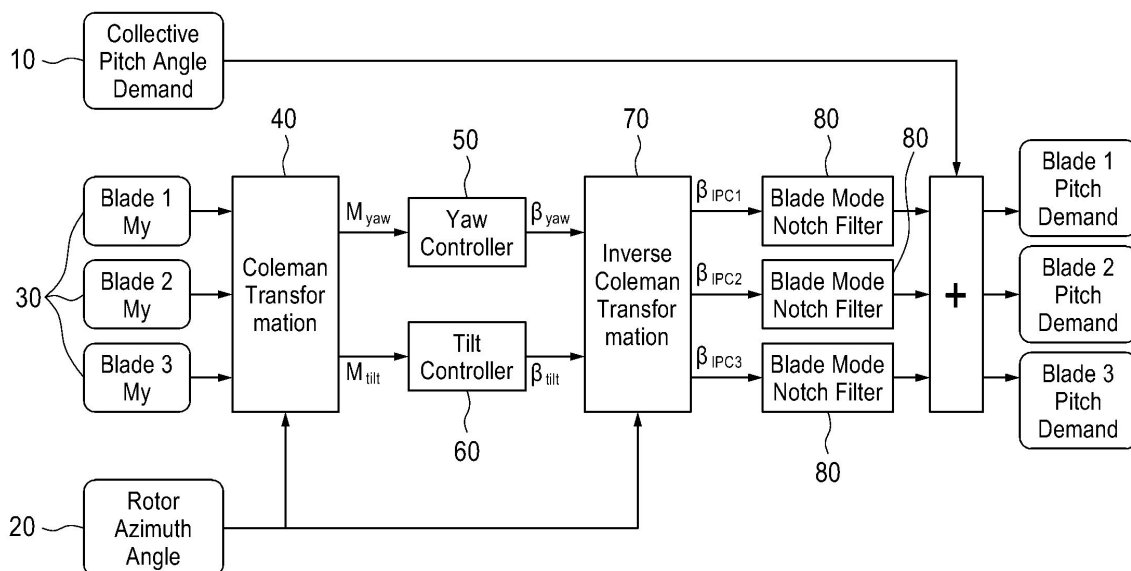
(54) 발명의 명칭 블레이드 모드 노치필터를 적용한 풍력터빈의 개별피치제어 시스템 및 제어방법

### (57) 요약

본 발명은 블레이드 모드 노치필터를 적용한 풍력터빈의 개별피치제어 시스템 및 제어방법에 관한 것으로, 보다 상세하게는 풍력터빈의 개별 블레이드의 피치각을 개별제어하기 위한 풍력터빈 개별피치제어시스템에 있어서, 통합피치명령을 제공하는 통합피치제어기; 및 각 개별 블레이드의 피치구동기에 개별피치명령을 제공하는 개별피치

(뒷면에 계속)

### 대표도



제어기;를 포함하고, 상기 개별피치제어기는, 블레이드 각각에 대한 굽힘모멘트와, 로터 방위각을 기반으로 틸팅 모멘트 하중성분과, 요잉 모멘트 하중성분을 산출하는 변환부; 요잉 모멘트 하중성분과 목표값을 대비하여 요 제어명령을 생성하는 요 제어기; 틸팅 모멘트 하중성분과 목표값을 대비하여 틸트 제어명령을 생성하는 틸트 제어기; 상기 요 제어명령과 상기 틸트 제어명령을 기반으로 각 블레이드에 대한 개별피치명령을 생성하는 역변환부; 및 상기 역변환부 전 또는 후에 구비되어, 블레이드 진동모드 주파수를 제거하는 블레이드 모드 노치필터;를 포함하고, 상기 통합피치명령과 상기 개별피치명령을 더하여 블레이드 각각에 대한 피치구동기의 구동을 제어하는 것을 특징으로 하는 블레이드 모드 노치필터를 이용한 풍력터빈 개별피치제어 시스템에 관한 것이다.

(52) CPC특허분류

F05B 2270/331 (2013.01)

Y02E 10/72 (2020.08)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

|             |                                  |
|-------------|----------------------------------|
| 과제고유번호      | 1415167269                       |
| 과제번호        | 20193010025810                   |
| 부처명         | 산업통상자원부                          |
| 과제관리(전문)기관명 | 한국에너지기술평가원                       |
| 연구사업명       | 에너지기술개발사업                        |
| 연구과제명       | 풍력터빈 신뢰성 향상 및 경량화를 위한 하중저감 기술 개발 |
| 기 여 율       | 1/2                              |
| 과제수행기관명     | 고등기술연구원                          |
| 연구기간        | 2019.05.01 ~ 2021.12.31          |

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

|             |                                     |
|-------------|-------------------------------------|
| 과제고유번호      | 1345301024                          |
| 과제번호        | 2019R1I1A3A01059235                 |
| 부처명         | 교육부                                 |
| 과제관리(전문)기관명 | 한국연구재단                              |
| 연구사업명       | 지역대학우수과학자지원사업                       |
| 연구과제명       | MW급 해상용 풍력터빈의 출력향상 및 하중저감 고도화 기술 개발 |
| 기 여 율       | 1/2                                 |
| 과제수행기관명     | 한밭대학교 산학협력단                         |
| 연구기간        | 2019.06.01 ~ 2024.05.31             |

## 명세서

### 청구범위

#### 청구항 1

풍력터빈의 개별 블레이드의 피치각을 개별제어하기 위한 풍력터빈 개별피치제어시스템에 있어서,  
 통합피치명령을 제공하는 통합피치제어기; 및 각 개별 블레이드의 피치구동기에 개별피치명령을 제공하는 개별 피치제어기;를 포함하고,  
 상기 개별피치제어기는,  
 블레이드 각각에 대한 굽힘모멘트와, 로터 방위각을 기반으로 틸팅 모멘트 하중성분과, 요잉 모멘트 하중성분을 산출하는 변환부;  
 요잉 모멘트 하중성분과 목표값을 대비하여 요 제어명령을 생성하는 요 제어기;  
 틸팅 모멘트 하중성분과 목표값을 대비하여 틸트 제어명령을 생성하는 틸트 제어기;  
 상기 요 제어명령과 상기 틸트 제어명령을 기반으로 각 블레이드에 대한 개별피치명령을 생성하는 역변환부; 및  
 상기 역변환부 전 또는 후에 구비되어, 블레이드 진동모드 주파수를 제거하는 블레이드 모드 노치필터;를 포함하고,  
 상기 통합피치명령과 상기 개별피치명령을 더하여 블레이드 각각에 대한 피치구동기의 구동을 제어하는 것을 특징으로 하는 블레이드 모드 노치필터를 이용한 풍력터빈 개별피치제어 시스템.

#### 청구항 2

제 1항에 있어서,  
 상기 블레이드 모드 노치필터는 블레이드의 평면 내 방향의 1차 진동모드 주파수를 제거하는 것을 특징으로 하는 블레이드 모드 노치필터를 이용한 풍력터빈 개별피치제어 시스템.

#### 청구항 3

제 2항에 있어서,  
 상기 블레이드 모드 노치필터는 하기의 수학적 식 3의 전달함수를 갖는 것을 특징으로 하는 블레이드 모드 노치필터를 이용한 풍력터빈 개별피치제어 시스템:

[수학적 식 3]

$$NF_{BM}(s) = \frac{s^2 + 2\zeta_1\omega_1s + \omega_1^2}{s^2 + 2\zeta_2\omega_2s + \omega_2^2}$$

s는 라플라스 변환 전달함수에서 표현되는 s평면이고,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ 는 노치필터의 주파수로서 블레이드의 진동모드 주파수와 같고,  $\zeta_1$ ,  $\zeta_2$ 는 노치필터의 감쇠비로 대역폭에 따라 선정한다.

#### 청구항 4

제 3항에 있어서,

상기 역변환부 전에 적용되는 경우, 상기 요 제어명령과 상기 틸트 제어명령 각각에 대해 상기 블레이드 모드 노치필터가 적용되고,

상기 역변환부 후에 적용되는 경우, 각 블레이드에 대한 개별피치명령 각각에 대해 상기 블레이드 모드 노치필터가 적용되는 것을 특징으로 하는 블레이드 모드 노치필터를 이용한 풍력터빈 개별피치제어 시스템.

## 청구항 5

제 1항에 있어서,

상기 변환부는,

각 블레이드 루트부의 평면외 방향 굽힘모멘트 각각과, 로터 방위각을 기반으로 콜맨(Coleman) 변환을 통해, 틸팅 모멘트 하중성분과, 요잉 모멘트 하중성분을 산출하는 것을 특징으로 하는 블레이드 모드 노치필터를 이용한 풍력터빈 개별피치제어 시스템.

## 청구항 6

제 5항에 있어서,

상기 역변환부는,

상기 요 제어명령과 상기 틸트 제어명령을 기반으로 콜맨 역변환을 통하여 각 블레이드에 대한 개별피치명령을 생성하는 것을 특징으로 하는 블레이드 모드 노치필터를 이용한 풍력터빈 개별피치제어 시스템.

## 청구항 7

제 6항에 있어서,

상기 요 제어기는 요잉 모멘트 하중성분과 목표값을 대비하여 오차성분을 산출하고, 상기 오차성분을 제어 목표값으로 만들기 위한 요 제어명령을 생성하고,

상기 틸트 제어기는 틸팅 모멘트 하중성분과 목표값을 대비하여 오차성분을 산출하고, 상기 오차성분을 제어 목표값으로 만들기 위한 틸트 제어명령을 생성하는 것을 특징으로 하는 블레이드 모드 노치필터를 이용한 풍력터빈 개별피치제어 시스템.

## 청구항 8

풍력터빈의 개별 블레이드의 피치각을 개별제어하기 위한 풍력터빈 개별피치제어방법에 있어서,

변환부가 각 블레이드의 굽힘모멘트 각각과, 로터 방위각을 기반으로 틸팅 모멘트 하중성분과, 요잉 모멘트 하중성분을 산출하는 제1단계;

요 제어기가 요잉 모멘트 하중성분과 목표값을 대비하여 요 제어명령을 생성하고, 틸트 제어기가 틸팅 모멘트 하중성분과 목표값을 대비하여 틸트 제어명령을 생성하는 제2단계;

역변환부가 상기 요 제어명령과 상기 틸트 제어명령을 기반으로 각 블레이드에 대한 개별피치명령을 생성하는 제3단계; 및

통합피치제어기에서 제공되는 통합피치명령과 상기 개별피치명령을 더하여 블레이드 각각에 대한 피치구동기의 구동을 제어하는 제4단계;를 포함하고,

상기 제3단계 전 또는 후에서,

블레이드 모드 노치필터가 블레이드 진동모드 주파수를 제거하는 것을 특징으로 하는 블레이드 모드 노치필터를 이용한 풍력터빈 개별피치제어방법.

### 청구항 9

제 8항에 있어서,

상기 블레이드 모드 노치필터는 블레이드의 평면 내 방향의 1차 진동모드 주파수를 제거하는 것을 특징으로 하는 블레이드 모드 노치필터를 이용한 풍력터빈 개별피치제어방법.

### 청구항 10

제 9항에 있어서,

상기 블레이드 모드 노치필터는 하기의 수학식 3의 전달함수를 갖는 것을 특징으로 하는 블레이드 모드 노치필터를 이용한 풍력터빈 개별피치제어방법:

[수학식 3]

$$NF_{BM}(s) = \frac{s^2 + 2\zeta_1\omega_1s + \omega_1^2}{s^2 + 2\zeta_2\omega_2s + \omega_2^2}$$

s는 라플라스 변환 전달함수에서 표현되는 s평면이고,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ 는 노치필터의 주파수로서 블레이드의 진동모드 주파수와 같고,  $\zeta_1$ ,  $\zeta_2$ 는 노치필터의 감쇠비로 대역폭에 따라 선정한다.

### 청구항 11

제 10항에 있어서,

상기 역변환부 전에 적용되는 경우, 상기 요 제어명령과 상기 틸트 제어명령 각각에 대해 상기 블레이드 모드 노치필터가 적용되고,

상기 역변환부 후에 적용되는 경우, 각 블레이드에 대한 개별피치명령 각각에 대해 상기 블레이드 모드 노치필터가 적용되는 것을 특징으로 하는 블레이드 모드 노치필터를 이용한 풍력터빈 개별피치제어방법.

### 청구항 12

제 8항에 있어서,

상기 제1단계는,

상기 변환부가, 각 블레이드 루트부의 평면외 방향 굽힘모멘트 각각과, 로터 방위각을 기반으로 콜맨(Coleman) 변환을 통해, 틸팅 모멘트 하중성분과, 요잉 모멘트 하중성분을 산출하는 것을 특징으로 하는 블레이드 모드 노치필터를 이용한 풍력터빈 개별피치제어방법.

### 청구항 13

제 12항에 있어서,

상기 제3단계는,

상기 역변환부가, 상기 요 제어명령과 상기 틸트 제어명령을 기반으로 콜맨 역변환을 통하여 각 블레이드에 대한 개별피치명령을 생성하는 것을 특징으로 하는 블레이드 모드 노치필터를 이용한 풍력터빈 개별피치제어방법.

## 청구항 14

제 13항에 있어서,

상기 제2단계는,

상기 요 제어기가 요잉 모멘트 하중성분과 목표값을 대비하여 오차성분을 산출하고, 상기 오차성분을 제어 목표값으로 만들기 위한 요 제어명령을 생성하고, 상기 틸트 제어기가 틸팅 모멘트 하중성분과 목표값을 대비하여 오차성분을 산출하고, 상기 오차성분을 제어 목표값으로 만들기 위한 틸트 제어명령을 생성하는 것을 특징으로 하는 블레이드 모드 노치필터를 이용한 풍력터빈 개별피치제어방법.

## 발명의 설명

### 기술 분야

[0001] 본 발명은 블레이드 모드 노치필터(Blade Mode Notch Filter)를 이용한 풍력터빈의 개별피치제어 방법에 관한 것으로, 더욱 상세하게는, 풍력터빈에서 고풍속이 되어 피치각이 커짐에 따라서 블레이드의 진동모드 가진을 피하고 전 풍속 영역에서 블레이드의 비대칭 하중을 최적으로 줄이기 위하여 개별피치제어 루프 안에 블레이드 모드 노치필터를 적용하는 방법에 관한 것이다.

### 배경 기술

[0002] 풍력터빈은 바람이 가진 에너지로부터 블레이드를 회전시켜 기계적 에너지로 전환하여 발전기를 통해 전기를 생산하는 기계이다. 풍력터빈의 출력제어 방법은 개념적으로 발전기의 회전속도를 제어하는 토크제어와 피치각을 제어하는 피치제어 두 가지 방법으로 구분할 수 있다.

[0003] 피치제어는 정격풍속 이상일 때 정격출력을 유지하는 역할뿐만 아니라 하중을 제어하는 역할을 한다. 일반적으로 대형 풍력터빈에 사용되는 피치제어의 종류로는 통합피치제어(CPC; Collective Pitch Control)와 개별피치제어(IPC; Individual Pitch Control)가 있다.

[0004] 통합피치제어는 풍력터빈으로 바람이 불어 로터가 회전할 때 각 블레이드가 서로 다른 로터 방위각이지만 모두 같은 피치각을 사용하는 제어 방법을 말한다.

[0005] 개별피치제어는 로터가 회전할 때 윈드시어, 타워새도우, 난류 등의 영향으로 각 블레이드에 발생하는 비대칭 하중을 줄이기 위하여, 각 블레이드의 피치각을 서로 다르게 사용하도록 독립적으로 제어하는 방법을 말한다.

[0006] 상기와 같은 풍력터빈의 개별피치제어에 있어서 중요하게 고려되어야 할 사항은 전 풍속 영역에서 피치각의 변동이 블레이드의 진동모드를 가진하지 않도록 개별피치제어기를 안정적으로 설계해야 한다는 점이다.

[0007] 하중저감 효과를 최대화하기 위해 개별피치제어기의 게인을 크게 사용하면, 어느 정도 큰 풍속에서 블레이드의 진동모드를 가진하게 된다. 따라서 개별피치제어 루프 안에 블레이드의 진동모드를 필터링함을 통하여, 안정성이 보장되고 최적의 하중저감 효과를 가지도록 개별피치제어기를 설계하는 방법이 필요하다.

[0008] 전체 피치제어기는 통합피치제어기에 의한 피치명령에 추가로 개별피치제어기에 의한 피치명령을 더하는 형태로 이루어진다. 풍력터빈의 각 블레이드 루트(root) 부의 평면의 방향(플랩방향) 굽힘모멘트와 로터 방위각의 정보를 입력받아 Coleman 변환부를 통하여 틸팅 모멘트와 요잉 모멘트의 두 하중 성분을 얻는다.

[0009] 이 두 개의 동하중 성분을 제어 목표 값인 0과 비교하여 각각의 오차 성분을 산출한다. 이 오차 성분을 줄이기 위하여 두 개의 제어기인 틸트 제어기(Tilt Controller)와 요 제어기(Yaw Controller)를 사용하여 각각의 피치 구동신호를 계산한다.

[0010] 이 두 피치 구동신호는 Coleman 역변환부를 통하여 각 블레이드에 대한 개별피치제어기의 피치 명령신호로 변환된다. 틸트 제어기와 요 제어기는 PI 제어기가 주로 사용된다.

[0011] 하지만 하중저감 효과를 최대화하기 위해 개별피치제어를 위한 틸트 제어기와 요 제어기의 게인들을 크게 사용할 경우, 풍속이 중단풍속으로 커질수록 개별피치제어기에 의한 피치각의 조절로 블레이드의 진동모드가 가진될 수 있는 문제점이 있다.

[0012] 따라서 고풍속 영역에서도 개별피치제어기가 블레이드의 진동모드를 가진하지 않고 전 풍속 영역에서 안정적인

로 작동하여 블레이드의 비대칭 하중을 최적으로 줄이는 제어 방법에 대한 개발이 요구되었다.

## 선행기술문헌

### 특허문헌

- [0013] (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

- [0014] 따라서 본 발명은 상기와 같은 종래의 문제점을 해결하기 위하여 안출된 것으로서, 하중저감 효과를 최대화하기 위해 개별피치제어를 위한 틸트 제어기와 요 제어기의 게인들을 크게 사용할 경우, 풍속이 중단풍속으로 커질수록 개별피치제어기에 의한 피치각의 조절로 블레이드의 진동모드가 가진되는 문제점을 극복하기 위하여, 본 발명의 실시예에 따르면, 기존의 방법을 보완하여 개별피치제어 루프 안에 블레이드 모드 노치필터를 적용하는 방법을 제공하는데 목적이 있다.
- [0015] 로터가 회전함에 따라 풍력터빈의 각 블레이드에 작용하는 비대칭 하중을 최적으로 줄이기 위하여 개별피치제어기를 적용함에 있어서, 큰 게인을 사용하면 고풍속 영역에서 블레이드의 진동모드를 가진하는 경우가 발생하고, 블레이드의 진동모드를 가진하게 되면 개별피치제어기 자체의 안정성 문제가 발생하고 블레이드의 피로하중이 커져 피로수명이 감소하게 되는 문제점을 해결하기 위해, 본 발명의 실시예에서는, 개별피치제어기가 전 풍속 영역에서 블레이드의 비대칭 하중을 최적으로 줄이고 블레이드의 진동모드를 가진하지 않고 안정하게 작동하도록 하는 것이 목적으로 한다.
- [0016] 본 발명의 실시예에 따르면, 기존의 개별피치제어 방법과 동일하게 각 블레이드 루트 부의 평면의 방향 굽힘모멘트와 로터 방위각의 정보를 입력받아 Coleman 변환부를 통하여 틸팅 모멘트와 요잉 모멘트의 두 하중 성분을 얻고 틸트 제어기와 요 제어기를 사용하고 상기의 해결 과제를 달성하기 위하여 개별피치제어 루프 안에 블레이드 모드 노치필터를 사용하여, 큰 게인을 사용할 때 고풍속이 될수록 발생하는 블레이드의 진동모드를 가진하는 문제를 방지할 수 있고 전 풍속에서 블레이드의 비대칭 하중을 최적으로 저감할 수 있는, 블레이드 모드 노치필터를 적용한 풍력터빈의 개별피치제어 시스템 및 제어방법을 제공하는데 그 목적이 있다.
- [0017] 본 발명의 실시예에 따르면, 풍력터빈의 블레이드 비대칭 하중을 줄임에 있어서, 개별피치제어기가 고풍속 구간에서 블레이드의 진동모드를 가진하는 문제를 방지하여 안정적으로 작동하게 할 수 있고, 또한 전 풍속 구간에서 블레이드 비대칭 하중을 최적으로 줄여 블레이드의 피로하중을 줄이고 피로수명을 연장할 수 있는, 블레이드 모드 노치필터를 적용한 풍력터빈의 개별피치제어 시스템 및 제어방법을 제공하는데 그 목적이 있다.
- [0018] 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

- [0019] 본 발명의 제1목적은, 풍력터빈의 개별 블레이드의 피치각을 개별제어하기 위한 풍력터빈 개별피치제어시스템에 있어서, 통합피치명령을 제공하는 통합피치제어기; 및 각 개별 블레이드의 피치구동기에 개별피치명령을 제공하는 개별피치제어기;를 포함하고, 상기 개별피치제어기는, 블레이드 각각에 대한 굽힘모멘트와, 로터 방위각을 기반으로 틸팅 모멘트 하중성분과, 요잉 모멘트 하중성분을 산출하는 변환부; 요잉 모멘트 하중성분과 목표값을 대비하여 요 제어명령을 생성하는 요 제어기; 틸팅 모멘트 하중성분과 목표값을 대비하여 틸트 제어명령을 생성하는 틸트 제어기; 상기 요 제어명령과 상기 틸트 제어명령을 기반으로 각 블레이드에 대한 개별피치명령을 생성하는 역변환부; 및 상기 역변환부 전 또는 후에 구비되어, 블레이드 진동모드 주파수를 제거하는 블레이드 모

드 노치필터;를 포함하고, 상기 통합피치명령과 상기 개별피치명령을 더하여 블레이드 각각에 대한 피치구동기의 구동을 제어하는 것을 특징으로 하는 블레이드 모드 노치필터를 이용한 풍력터빈 개별피치제어 시스템으로서 달성될 수 있다.

[0020] 그리고 상기 블레이드 모드 노치필터는 블레이드의 평면 내 방향의 1차 진동모드 주파수를 제거하는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0021] 또한 상기 블레이드 모드 노치필터는 하기의 수학식 3의 전달함수를 갖는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0022] [수학식 3]

$$NF_{BM}(s) = \frac{s^2 + 2\zeta_1\omega_1s + \omega_1^2}{s^2 + 2\zeta_2\omega_2s + \omega_2^2}$$

[0023]

[0024]  $s$ 는 라플라스 변환 전달함수에서 표현되는  $s$ 평면이고,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ 는 노치필터의 주파수로서 블레이드의 진동모드 주파수와 같고,  $\zeta_1$ ,  $\zeta_2$ 는 노치필터의 감쇠비로 대역폭에 따라 선정한다.

[0025] 그리고 상기 역변환부 전에 적용되는 경우, 상기 요 제어명령과 상기 틸트 제어명령 각각에 대해 상기 블레이드 모드 노치필터가 적용되고, 상기 역변환부 후에 적용되는 경우, 각 블레이드에 대한 개별피치명령 각각에 대해 상기 블레이드 모드 노치필터가 적용되는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0026] 또한 상기 변환부는, 각 블레이드 루트부의 평면의 방향 굽힘모멘트 각각과, 로터 방위각을 기반으로 콜맨 (Coleman) 변환을 통해, 틸팅 모멘트 하중성분과, 요잉 모멘트 하중성분을 산출하는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0027] 그리고 상기 역변환부는, 상기 요 제어명령과 상기 틸트 제어명령을 기반으로 콜맨 역변환을 통하여 각 블레이드에 대한 개별피치명령을 생성하는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0028] 또한 상기 요 제어기는 요잉 모멘트 하중성분과 목표값을 대비하여 오차성분을 산출하고, 상기 오차성분을 제어 목표값으로 만들기 위한 요 제어명령을 생성하고, 상기 틸트 제어기는 틸팅 모멘트 하중성분과 목표값을 대비하여 오차성분을 산출하고, 상기 오차성분을 제어 목표값으로 만들기 위한 틸트 제어명령을 생성하는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0029] 본 발명의 제2목적은, 풍력터빈의 개별 블레이드의 피치각을 개별제어하기 위한 풍력터빈 개별피치제어방법에 있어서, 변환부가 각 블레이드의 굽힘모멘트 각각과, 로터 방위각을 기반으로 틸팅 모멘트 하중성분과, 요잉 모멘트 하중성분을 산출하는 제1단계; 요 제어기가 요잉 모멘트 하중성분과 목표값을 대비하여 요 제어명령을 생성하고, 틸트 제어기가 틸팅 모멘트 하중성분과 목표값을 대비하여 틸트 제어명령을 생성하는 제2단계; 역변환부가 상기 요 제어명령과 상기 틸트 제어명령을 기반으로 각 블레이드에 대한 개별피치명령을 생성하는 제3단계; 및 통합피치제어기에서 제공되는 통합피치명령과 상기 개별피치명령을 더하여 블레이드 각각에 대한 피치구동기의 구동을 제어하는 제4단계;를 포함하고, 상기 제3단계 전 또는 후에서, 블레이드 모드 노치필터가 블레이드 진동모드 주파수를 제거하는 것을 특징으로 하는 블레이드 모드 노치필터를 이용한 풍력터빈 개별피치 제어방법으로서 달성될 수 있다.

[0030] 제2목적에 있어서, 상기 블레이드 모드 노치필터는 블레이드의 평면 내 방향의 1차 진동모드 주파수를 제거하는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0031] 제2목적에 있어서, 상기 블레이드 모드 노치필터는 하기의 수학식 3의 전달함수를 갖는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0032] [수학식 3]

$$NF_{BM}(s) = \frac{s^2 + 2\zeta_1\omega_1s + \omega_1^2}{s^2 + 2\zeta_2\omega_2s + \omega_2^2}$$

[0033]

[0034]  $s$ 는 라플라스 변환 전달함수에서 표현되는  $s$ 평면이고,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ 는 노치필터의 주파수로서 블레이드의 진동모드

주파수와 같고,  $\zeta_1$ ,  $\zeta_2$ 는 노치필터의 감쇠비로 대역폭에 따라 선정한다.

- [0035] 제2목적에 있어서, 상기 역변환부 전에 적용되는 경우, 상기 요 제어명령과 상기 틸트 제어명령 각각에 대해 상기 블레이드 모드 노치필터가 적용되고, 상기 역변환부 후에 적용되는 경우, 각 블레이드에 대한 개별피치명령 각각에 대해 상기 블레이드 모드 노치필터가 적용되는 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0036] 그리고 상기 제1단계는, 상기 변환부가, 각 블레이드 루트부의 평면의 방향 굽힘모멘트 각각과, 로터 방위각을 기반으로 콜맨(Coleman) 변환을 통해, 틸팅 모멘트 하중성분과, 요잉 모멘트 하중성분을 산출하는 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0037] 또한 상기 제3단계는, 상기 역변환부가, 상기 요 제어명령과 상기 틸트 제어명령을 기반으로 콜맨 역변환을 통하여 각 블레이드에 대한 개별피치명령을 생성하는 것을 특징으로 할 수 있다.
- [0038] 그리고 상기 제2단계는, 상기 요 제어기가 요잉 모멘트 하중성분과 목표값을 대비하여 오차성분을 산출하고, 상기 오차성분을 제어 목표값으로 만들기 위한 요 제어명령을 생성하고, 상기 틸트 제어기가 틸팅 모멘트 하중성분과 목표값을 대비하여 오차성분을 산출하고, 상기 오차성분을 제어 목표값으로 만들기 위한 틸트 제어명령을 생성하는 것을 특징으로 할 수 있다.

### 발명의 효과

- [0039] 하중저감 효과를 최대화하기 위해 개별피치제어를 위한 틸트 제어기와 요 제어기의 게인들을 크게 사용할 경우, 풍속이 중단풍속으로 커질수록 개별피치제어기에 의한 피치각의 조절로 블레이드의 진동모드가 가진되는 문제점을 극복하기 위하여, 본 발명의 실시예에 따르면, 기존의 방법을 보완하여 개별피치제어 루프 안에 블레이드 모드 노치필터를 적용하는 방법을 제공할 수 있다.
- [0040] 로터가 회전함에 따라 풍력터빈의 각 블레이드에 작용하는 비대칭 하중을 최적으로 줄이기 위하여 개별피치제어기를 적용함에 있어서, 큰 게인을 사용하면 고풍속 영역에서 블레이드의 진동모드를 가진하는 경우가 발생하고, 블레이드의 진동모드를 가진하게 되면 개별피치제어기 자체의 안정성 문제가 발생하고 블레이드의 피로하중이 커져 피로수명이 감소하게 되는 문제점을 해결하기 위해, 본 발명의 실시예에 따른 블레이드 모드 노치필터를 적용한 풍력터빈의 개별피치제어 시스템 및 제어방법에 의하면, 개별피치제어기가 전 풍속 영역에서 블레이드의 비대칭 하중을 최적으로 줄이고 블레이드의 진동모드를 가진하지 않고 안정하게 작동할 수 있는 효과를 갖는다.
- [0041] 본 발명의 실시예에 따른 블레이드 모드 노치필터를 적용한 풍력터빈의 개별피치제어 시스템 및 제어방법에 따르면, 기존의 개별피치제어 방법과 동일하게 각 블레이드 루트 부의 평면의 방향 굽힘모멘트와 로터 방위각의 정보를 입력받아 Coleman 변환부를 통하여 틸팅 모멘트와 요잉 모멘트의 두 하중 성분을 얻고 틸트 제어기와 요 제어기를 사용하고 상기의 해결 과제를 달성하기 위하여 개별피치제어 루프 안에 블레이드 모드 노치필터를 사용하여, 큰 게인을 사용할 때 고풍속이 될수록 발생하는 블레이드의 진동모드를 가진하는 문제를 방지할 수 있고 전 풍속에서 블레이드의 비대칭 하중을 최적으로 저감할 수 있는 효과를 갖는다.
- [0042] 본 발명의 실시예에 따른 블레이드 모드 노치필터를 적용한 풍력터빈의 개별피치제어 시스템 및 제어방법에 의하면, 풍력터빈의 블레이드 비대칭 하중을 줄임에 있어서, 개별피치제어기가 고풍속 구간에서 블레이드의 진동모드를 가진하는 문제를 방지하여 안정적으로 작동하게 할 수 있고, 또한 전 풍속 구간에서 블레이드 비대칭 하중을 최적으로 줄여 블레이드의 피로하중을 줄이고 피로수명을 연장할 수 있는 효과를 갖는다.
- [0043] 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

- [0044] 본 명세서에 첨부되는 다음의 도면들은 본 발명의 바람직한 실시예를 예시하는 것이며, 발명의 상세한 설명과 함께 본 발명의 기술적 사상을 더욱 이해시키는 역할을 하는 것이므로, 본 발명은 그러한 도면에 기재된 사항에만 한정되어 해석 되어서는 아니 된다.

도 1은 개별피치제어를 모식적으로 나타낸 풍력터빈의 사진,

도 2는 개별피치제어 시스템의 블록도,

도 3은 평균풍속 16m/s에서 고정된 계인을 적용한 피치각 응답의 파워스펙트럼밀도,  
 도 4는 평균풍속 24m/s에서 고정된 계인을 적용한 피치각 응답의 파워스펙트럼밀도,  
 도 5는 본 발명의 실시예에 따른 블레이드 모드 노치필터를 적용한 풍력터빈의 개별피치제어 시스템의 블록도,  
 도 6은 본 발명의 실시예에 따라 설계된 블레이드 모드 노치필터의 주파수 응답,  
 도 7은 평균풍속 16m/s에서, 기존 개별피치제어를 적용한 경우와, 본 발명의 실시예에 따른 블레이드 모드 노치필터를 적용한 피치각 응답의 파워스펙트럼밀도 비교 그래프,  
 도 8은 평균풍속 24m/s에서, 기존 개별피치제어를 적용한 경우와, 본 발명의 실시예에 따른 블레이드 모드 노치필터를 적용한 피치각 응답의 파워스펙트럼밀도 비교 그래프,  
 도 9는 평균풍속 12m/s에서 블레이드 루트부의 평면외 방향의 굽힘모멘트에 대한 대표적인 시간 응답을 비교그 래프,  
 도 10은 평균풍속 24m/s에서 블레이드 루트부의 평면외 방향의 굽힘모멘트에 대한 대표적인 시간 응답을 비교그 래프,  
 도 11과 도 12는 기존 개별피치제어를 적용한 경우와, 본 발명의 실시예에 따른 블레이드 모드 노치필터를 적용 했을 때의 블레이드 루트 부의 평면외 방향의 굽힘모멘트에 대한 등가 피로하중(DEL; Damage Equivalent Load) (도 11)과, 이의 감소율(도 12)을 정격풍속 이상에서 풍속별 그래프를 도시한 것이다.

### 발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0045] 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 구체화 될 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.
- [0046] 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.
- [0047] 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, 직 각으로 도시된 영역은 라운드지거나 소정 곡률을 가지는 형태일 수 있다. 따라서 도면에서 예시된 영역들은 속 성을 가지며, 도면에서 예시된 영역들의 모양은 소자의 영역의 특정 형태를 예시하기 위한 것이며 발명의 범주 를 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 용어 들은 단지 어느 구성요소를 다른 구성요소와 구별시키기 위해서 사용되었을 뿐이다. 여기에 설명되고 예시되는 실시예들은 그것의 상보적인 실시예들도 포함한다.
- [0048] 본 명세서에서 사용된 용어는 실시예들을 설명하기 위한 것이며 본 발명을 제한하고자 하는 것은 아니다. 본 명 세서에서, 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.
- [0049] 아래의 특정 실시예들을 기술하는데 있어서, 여러 가지의 특정적인 내용들은 발명을 더 구체적으로 설명하고 이 해를 돕기 위해 작성되었다. 하지만 본 발명을 이해할 수 있을 정도로 이 분야의 지식을 갖고 있는 독자는 이러 한 여러 가지의 특정적인 내용들이 없어도 사용될 수 있다는 것을 인지할 수 있다. 어떤 경우에는, 발명을 기술 하는 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.
- [0050] 이하에서는 풍력터빈의 개별피치제어 시스템(1)의 구성, 기능 및 제어방법에 대해 설명하도록 한다.
- [0051] 먼저, 각 블레이트의 개별피치를 제어하는 방법에 대해 설명하도록 한다. 도 1은 개별피치제어를 모식적으로 나

타낸 풍력터빈의 사진을 나타낸 것이다. 그리고 도 2는 개별피치제어 시스템의 블록도를 도시한 것이다.

[0052] 일반적으로 대형 풍력터빈(2)에 사용되는 피치제어의 종류로는 통합피치제어(CPC)와 개별피치제어(IPC)가 있다. 통합피치제어는 바람이 불어 로터가 회전할 때 각 블레이드가 서로 다른 로터 방위각( $\theta$ )이지만 모두 같은 피치각( $\beta$ )을 사용하는 제어 방법을 말한다.

[0053] 이와 달리 본 발명에 적용되는 개별피치제어는 도 1에 도시된 바와 같이, 로터(3)가 회전할 때 각 블레이드(4)가 서로 다른 로터 방위각( $\theta$ )에서 서로 다른 피치각( $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ )을 사용하는 제어 방법을 말한다.

[0054] 도 2에 도시된 바와 같이, 개별피치제어시스템(1)은, 전체적으로 통합피치제어기(10), 개별피치제어기를 포함하며, 개별피치제어기는, 변환부(40), 요 제어기(50), 틸트 제어기(60), 역변환부(70) 등을 포함하여 구성된다.

[0055] 먼저 통합피치제어기(10)는 통합피치명령을 제공하며, 변환부(40)는 블레이드(4) 각각에 대한 굽힘모멘트와, 로터 방위각을 기반으로 틸팅 모멘트 하중성분과, 요잉 모멘트 하중성분을 산출하게 된다. 그리고 요 제어기(50)는 요잉 모멘트 하중성분과 목표값을 대비하여 요 제어명령을 생성하고, 틸트제어기(60)는 틸팅 모멘트 하중성분과 목표값을 대비하여 틸트 제어명령을 생성하게 된다.

[0056] 그리고 역변환부(70)는 요 제어명령과 틸트 제어명령을 기반으로 각 블레이드(4)에 대한 개별피치명령을 생성하도록 구성된다.

[0057] 따라서 통합피치명령과 개별피치명령을 더하여 블레이드(4) 각각에 대한 피치구동기의 구동을 제어하게 된다. 즉, 통합피치제어기(10)의 피치 명령에 개별피치제어기의 피치 명령을 더하는 형태로 피치제어가 이루어진다.

[0058] 개별피치제어를 위해서는 로터(3)가 회전할 때 각 블레이드(4)가 서로 다른 로터 방위각을 가짐으로 블레이드(4)에 발생하는 비대칭 하중 성분을 피드백하는 것이 필요하다.

[0059] 변환부(40)는 굽힘모멘트 측정부(30)로부터 풍력터빈(2)으로부터 각 블레이드(4) 루트 부의 평면의 방향(플랩 방향) 굽힘모멘트( $M_{y1}, M_{y2}, M_{y3}$ )를 입력받고, 로터방위각 측정부(30)에서 로터 방위각( $\theta$ )을 입력받아, 이하의 수학적 식 (1)의 Coleman 변환을 통하여 틸팅 모멘트와 요잉 모멘트의 두 개의 하중 성분( $M_{tilt}, M_{yaw}$ )을 얻는다.

[0060] [수학적 식 1]

$$\begin{pmatrix} M_{tilt} \\ M_{yaw} \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta+2\pi/3) & \cos(\theta+4\pi/3) \\ \sin\theta & \sin(\theta+2\pi/3) & \sin(\theta+4\pi/3) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} M_{y1} \\ M_{y2} \\ M_{y3} \end{pmatrix}$$

[0061]

[0062] 이 두 개의 틸팅 모멘트와 요잉 모멘트 하중 성분을 제어 목표 값인 0과 비교하여 각각의 오차 성분을 산출한다. 각각의 오차 성분을 제어 목표 값인 0으로 만들기 위해 틸트 제어기(60)와 요 제어기(50)가 사용된다.

[0063] 틸트 제어기(60)와 요 제어기(50)는 PI 제어기가 많이 사용된다. 틸트 제어기(60)와 요 제어기(50)를 통해 각각의 제어 명령( $\beta_{tilt}, \beta_{yaw}$ )이 결정되고, 이하의 수학적 식 (2)의 Coleman 역변환을 통하여 각 블레이드에 대한 개별피치 명령( $\beta_{IPC1}, \beta_{IPC2}, \beta_{IPC3}$ )을 얻는다.

[0064] [수학적 식 2]

$$\begin{pmatrix} \beta_{IPC1} \\ \beta_{IPC2} \\ \beta_{IPC3} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ \cos(\theta+2\pi/3) & \sin(\theta+2\pi/3) \\ \cos(\theta+4\pi/3) & \sin(\theta+4\pi/3) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \beta_{tilt} \\ \beta_{yaw} \end{pmatrix}$$

[0065]

[0066] 이렇게 결정된 각 블레이드(4)에 대한 개별피치제어 명령과 통합피치제어 명령을 더하여 각 블레이드(4)의 피치 구동기를 작동시키게 된다.

[0067] 이하에서는 기존 개별피치제어 방법의 문제점에 대해 설명하도록 한다.

- [0068] 틸트 제어기(60)와 요 제어기(50)는 PI 제어기가 많이 사용되는데, PI 제어기의 경우 비례계인과 적분계인이 사용된다. 기존의 개별피치제어 방법에서 풍력터빈(2)이 운전되는 전 풍속구간에서 충분히 좋은 제어 효과를 가지는 틸트 제어기(60)와 요 제어기(50)의 계인들을 설계하여 사용할 때, 고풍속이 될수록 블레이드의 진동모드를 가진하는 문제점이 발생할 수 있다.
- [0069] 이의 문제점을 5MW 풍력터빈을 대상으로 수치실험을 수행한 결과를 예시로 설명하고자 한다. 수치실험에서는 IEC-61400-1 규정의 Class A에 해당하는 10분의 난류풍속을 이용한다. 5MW 풍력터빈의 정격풍속은 약 12m/s이고 중단풍속은 24m/s이다. 로터의 정격회전속도는 12.1rpm이고 블레이드는 세 개이므로, 0.2Hz인 1P 성분과 0.6Hz인 3P 성분이 풍력터빈의 하중 및 출력 응답에 나타난다. 그리고 블레이드(4)의 평면내 방향(엣지방향) 1차 진동모드 주파수는 1.1Hz이다.
- [0070] 풍력터빈(2)의 공력토크와 추력은 블레이드(4)의 피치각 변화에 대하여 비선형적인 특성을 가진다. 풍속이 커질수록 피치각의 변화에 대한 공력토크와 추력의 변동은 커지는 경향을 가진다. 그러므로 개별피치제어기(100)의 작동 시에도 고풍속이 될수록 피치각의 변동이 블레이드의 진동모드에 영향을 줄 수가 있다.
- [0071] 틸트 제어기(60)와 요 제어기(50)의 PI 제어기를 설계하여 전 풍속구간에서 고정된 계인을 적용한 경우(1X)와 이의 5배인 경우(5X)와 이의 10배인 경우(10X)에 대한 결과를 살펴보도록 한다.
- [0072] 1X인 경우는 개별피치제어기(100)의 블레이드 하중저감 효과가 충분히 있는 예시이고, 5X와 10X인 경우는 하중저감 효과를 더 좋게 하기 위하여 제어 계인을 더 크게 사용한 예시이다.
- [0073] 개별피치제어기(100)의 계인을 크게 사용하면 제어루프의 대역폭이 넓어지기 때문에, 블레이드 피치각의 대역폭 또한 넓어져서 피치각의 변동이 블레이드의 진동모드를 가진할 수도 있게 된다.
- [0074] 고정된 계인을 사용한 개별피치제어기(100)를 적용한 블레이드 피치각의 시간 응답에서 파워스펙트럼밀도(PSD)를 구하여 피치각이 블레이드의 진동모드를 가진하는지의 여부를 확인할 수 있다. 도 3과 도 4는 각각 평균풍속 16m/s와 평균풍속 24m/s의 난류풍속에 대하여 고정된 계인을 사용한 경우의 블레이드 피치각의 파워스펙트럼밀도(PSD)를 보여 준다.
- [0075] 개별피치제어기(100)는 블레이드의 평면외 방향 굽힘모멘트에 작용하는 1P 성분을 줄이는 것이 목표이므로, 도 3과 도 4 모두에서 피치각은 주로 0.2Hz의 1P 성분으로 변동함을 확인할 수 있다.
- [0076] 16m/s에서는 1X, 5X, 10X 모든 경우에서 블레이드의 평면내 방향 1차 진동모드 주파수인 1.1Hz를 가진하지 않음을 확인할 수 있다. 그러나 고풍속인 24m/s에서는 5X와 10X인 경우에는 블레이드의 평면내 방향 1차 진동모드 주파수(1.1Hz)를 가진함을 명확히 확인할 수 있다.
- [0077] 10X의 경우 5X의 경우보다 피치각의 대역폭이 더 넓어져서 이 진동모드를 더 많이 가진함을 확인할 수 있다. 풍속별 확인 결과 평균풍속 18m/s 이상에서는 5X와 10X인 경우 블레이드의 평면내 방향 1차 진동모드 주파수(1.1Hz)를 가진함을 확인할 수 있었다. 이는 개별피치제어기의 블레이드 하중저감 효과를 높이기 위하여 더 큰 계인을 사용하여 전 풍속구간에서 사용할 경우, 고풍속 영역에서 블레이드의 진동모드가 가진되는 문제점이 발생할 수 있음을 의미한다.
- [0078] 이하에서는 본 발명의 실시예에 따른 블레이드 모드 노치필터를 적용한 풍력터빈의 개별피치제어 시스템(200)의 구성, 기능 및 제어방법에 대해 설명하도록 한다. 먼저, 도 5는 본 발명의 실시예에 따른 블레이드 모드 노치필터를 적용한 풍력터빈의 개별피치제어 시스템의 블록도를 도시한 것이다.
- [0079] 본 발명의 실시예를 통하여 풍력터빈의 블레이드 비대칭 하중을 줄임에 있어서 개별피치제어기(100)가 고풍속 구간에서 블레이드의 진동모드를 가진하는 문제를 방지하여 안정적으로 작동하게 할 수 있게 된다.
- [0080] 개별피치제어기(100)의 계인은 정격풍속 부근에서는 크게 사용할 수 있지만, 중단풍속 부근의 고풍속 구간에서는 크게 사용할 수 없다는 점을 확인하였다(도 3, 도 4).
- [0081] 그러므로 개별피치제어기가 블레이드의 진동모드를 가진하는 것을 방지하지 위하여 본 발명의 실시예에서는 블레이드 모드 노치필터를 적용한다.
- [0082] 도 5에 도시된 바와 같이, 도 2의 기존 개별피치제어기에서 각 블레이드(4)에 대한 개별피치명령( $\beta_{IPC1}$ ,  $\beta_{IPC2}$ ,  $\beta_{IPC3}$ )에 블레이드 모드 노치필터(80)가 추가됨을 알 수 있다.
- [0083] 블레이드 모드 노치필터(80)의 전달함수는 이하의 수학적 식 3과 같고, 노치필터의 주파수( $\omega_1$ ,  $\omega_2$ )는 블레이드의

진동모드 주파수와 같이 두고, 노치필터의 감쇠비( $\zeta_1$ ,  $\zeta_2$ )는 대역폭에 따라 선정한다.

[0084] [수학식 3]

$$NF_{BM}(s) = \frac{s^2 + 2\zeta_1\omega_1s + \omega_1^2}{s^2 + 2\zeta_2\omega_2s + \omega_2^2}$$

[0085]

s는 라플라스 변환 전달함수에서 표현되는 s평면이다.

본 발명의 실시예에 따른 블레이드 모드 노치필터(80)는 Coleman 역변환부(70) 전 또는 후 모두 적용가능하다, 도 5는 Coleman 역변환부(70) 후에 적용된 경우를 보여준다.

[0087] Coleman 역변환부(70) 전에 적용될 경우, 틸트 제어기(60)와 요 제어기(70)를 통해 계산된 두 제어 명령( $\beta_{\text{tilt}}$ ,  $\beta_{\text{yaw}}$ )에 대하여 블레이드 모드 노치필터(80)가 적용된다. Coleman 역변환부(70) 후에 적용될 경우 도 5에 도시된 바와 같이, 각 블레이드(4)에 대한 세 개별피치 명령( $\beta_{\text{IPC1}}$ ,  $\beta_{\text{IPC2}}$ ,  $\beta_{\text{IPC3}}$ )에 대하여 블레이드 모드 노치필터(80)가 적용됨을 알 수 있다.

[0088] 이하에서는 본 발명의 실시예에 따른 블레이드 모드 노치필터(80)를 적용한 경우의 효과 확인에 대해 설명하도록 한다. 실제와 유사한 풍속인 난류풍속을 사용하여 풍력터빈 제어시스템의 성능을 평가하는 것은 매우 중요하다. 사용한 난류풍속은 IEC-61400-1의 규정에 따라서 생성된 것으로, Class A에 해당하는 10분 동안의 풍속을 이용하였다.

[0089] 틸트 제어기(60)와 요 제어기(50)의 PI 제어기를 설계하여 전 풍속구간에서 기존의 개별피치제어 방법을 적용한 경우(1X)와 블레이드 모드 노치필터(80)를 적용한 경우(10X)에 대한 결과를 살펴보도록 한다.

[0090] 블레이드 모드 노치필터(80)는 도 6에 도시된 바와 같이, 블레이드(4)의 평면내 방향의 1차 진동모드 주파수인 1.1Hz가 제거되도록 구현하였다.

[0091] 고풍속 구간에서 블레이드(4)의 평면내 방향의 진동모드가 가진되지 않게 함으로, 정격풍속에서 종단풍속까지 모든 풍속 구간에서 10배(10X)로 큰 계인을 사용하도록 하였다.

[0092] 이와 같이 기존의 개별피치제어기에 블레이드 모드 노치필터(80)를 적용하면, 정격풍속 부근에서는 큰 계인을 사용하여 최적의 하중저감 효과를 얻고, 종단풍속 부근에서도 블레이드의 진동모드를 가진하지 않고 안정적으로 작동함과 동시에 최적의 하중저감 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

[0093] 도 7과 도 8은 각각 평균풍속 16m/s와 평균풍속 24m/s의 난류풍속에 대한 블레이드 피치각의 파워스펙트럼밀도(PSD)를 기존의 개별피치제어 방법과 블레이드 모드 노치필터(80)를 적용한 경우를 비교하여 보여 준다.

[0094] 평균풍속 16m/s와 24m/s 모두에서 개별피치제어기가 블레이드의 평면내 방향 1차 진동모드 주파수인 1.1Hz를 제거함을 확인할 수 있다. 이는 기존의 개별피치제어 방법을 적용할 경우 고풍속 구간에서 발생할 수 있는 블레이드의 진동모드를 가진하는 문제를 블레이드 모드 노치필터(80)를 사용함으로 해결할 수 있음을 보여준다.

[0095] 실제와 유사한 난류풍속에 대하여 개별피치제어기를 적용했을 때의 풍속별 응답과 등가 피로하중을 살펴보자. 도 9와 도 10은 각각 평균풍속 12m/s와 평균풍속 24m/s에서 블레이드 루트 부의 평면외 방향의 굽힘모멘트에 대한 대표적인 시간 응답을 비교하여 보여준다.

[0096] 도 11과 도 12는 개별피치제어기를 적용했을 때의 블레이드 루트 부의 평면외 방향의 굽힘모멘트에 대한 등가 피로하중(DEL; Damage Equivalent Load)과 이의 감소율을 정격풍속 이상에서 풍속별로 각각 보여준다.

[0097] 기존의 개별피치제어 방법을 사용한 경우(1X) 블레이드의 등가 피로하중 감소율은 전 풍속구간에서 10~17% 정도이다. 블레이드 모드 노치필터(80)를 적용한 경우 블레이드의 등가 피로하중 감소율은 전 풍속구간에서 12~25% 정도로 훨씬 좋아짐을 확인할 수 있다.

[0098] 블레이드 모드 노치필터(80)를 적용함으로 대부분의 풍속에서 블레이드의 등가 피로하중 감소율은 2~10% 정도로 훨씬 좋아지고, 특히 등가 피로하중이 매우 큰 고풍속 구간(20~24m/s)에서 블레이드의 진동모드를 가진하지 않고 최적으로 줄일 수 있음을 확인할 수 있다.

[0099] 따라서 풍력터빈에서 개별피치제어 루프 안에 블레이드 모드 노치필터를 적용하면, 고풍속 영역에서 발생할 수

있는 블레이드의 진동모드 가진 문제를 해결하여 개별피치제어기를 안정적으로 작동하게 할 수 있고, 전 풍속구간에서 블레이드의 비대칭 하중을 최적으로 줄이고 등가 피로하중을 줄여 피로수명을 연장할 수 있다.

[0100] 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.

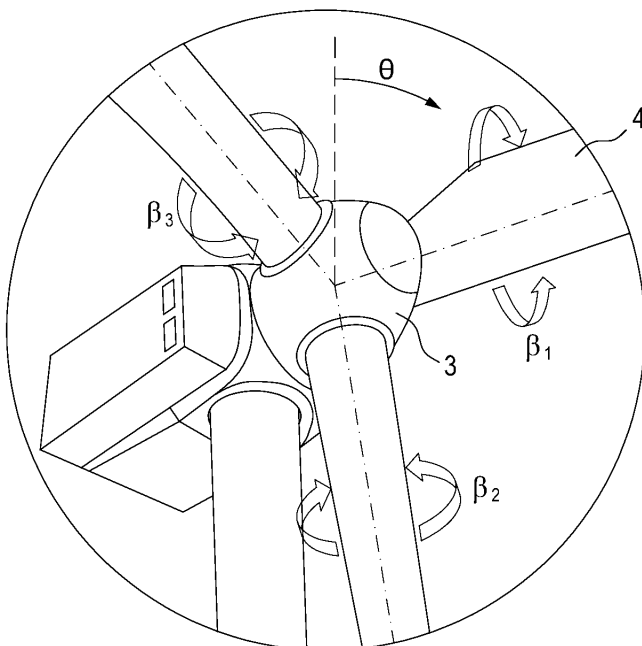
### 부호의 설명

- [0101]
- 1: 풍력터빈 개별피치제어 시스템
  - 2: 풍력터빈
  - 3: 로터
  - 4: 블레이드
  - 10: 통합피치제어기
  - 20: 로터 방위각 측정부
  - 30: 굽힘모멘트 측정부
  - 40: 콜맨변환부
  - 50: 요 제어기
  - 60: 틸트 제어기
  - 70: 콜맨 역변환부
  - 80: 블레이드 모드 노치필터
  - 100: 개별피치제어기
  - 200: 블레이드 모드 노치필터를 이용한 풍력터빈 개별피치제어 시스템

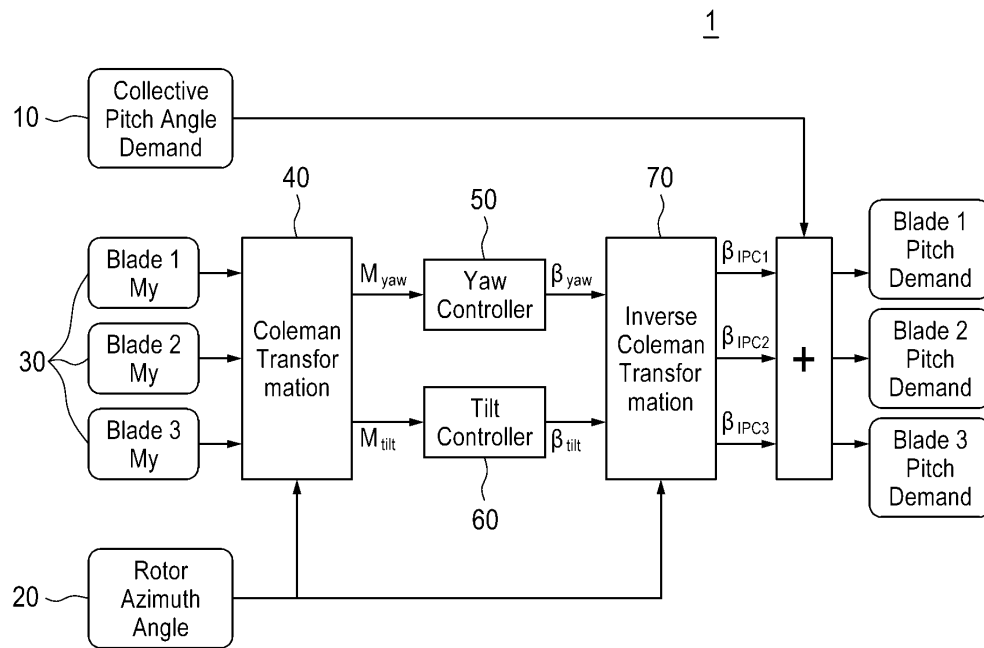
### 도면

#### 도면1

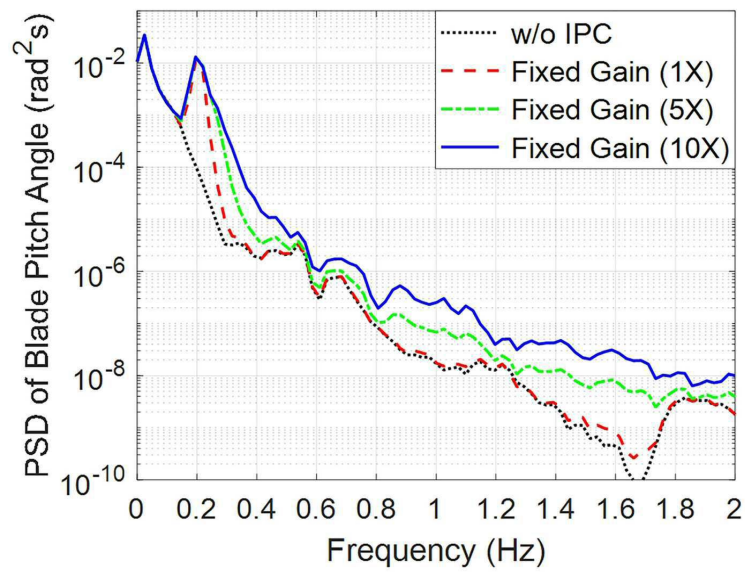
2



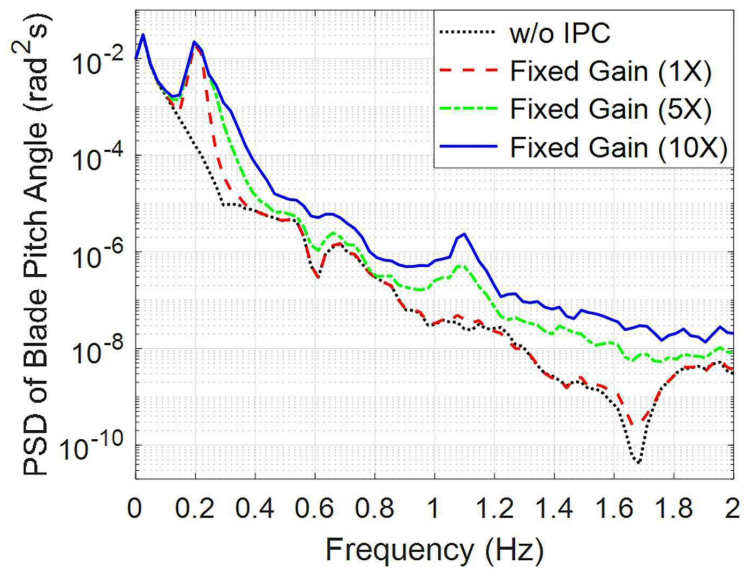
도면2



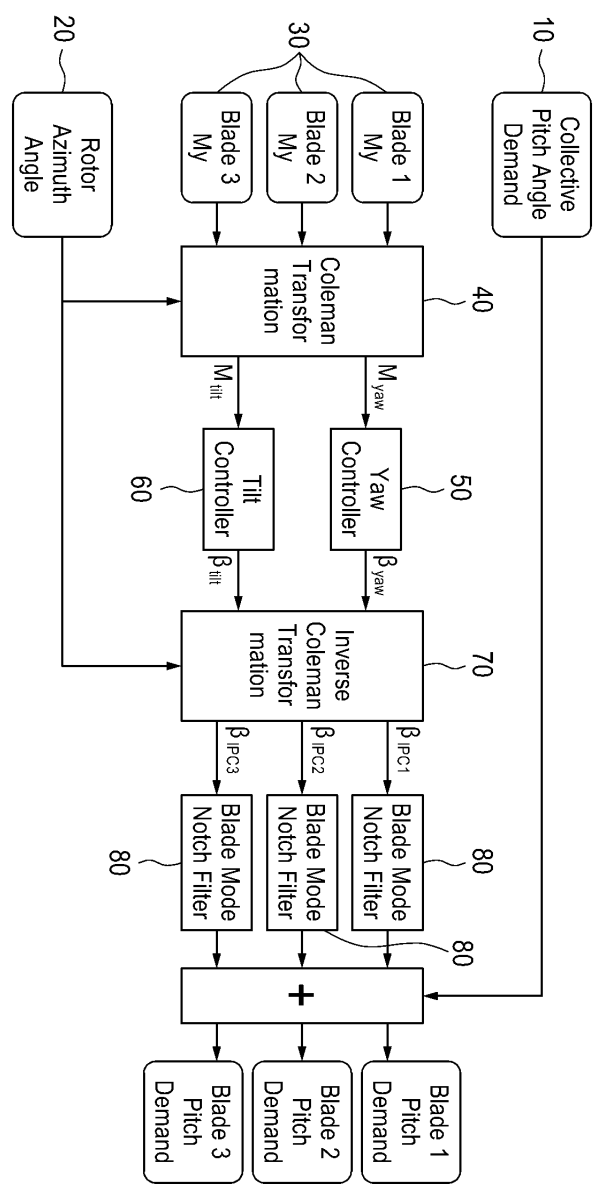
도면3



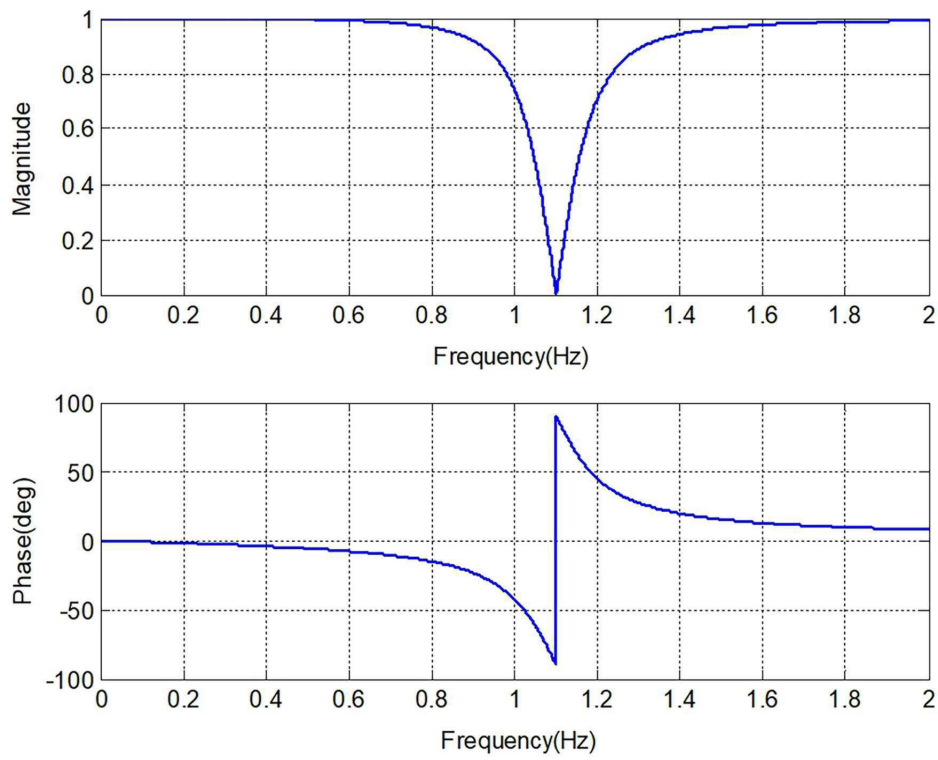
도면4



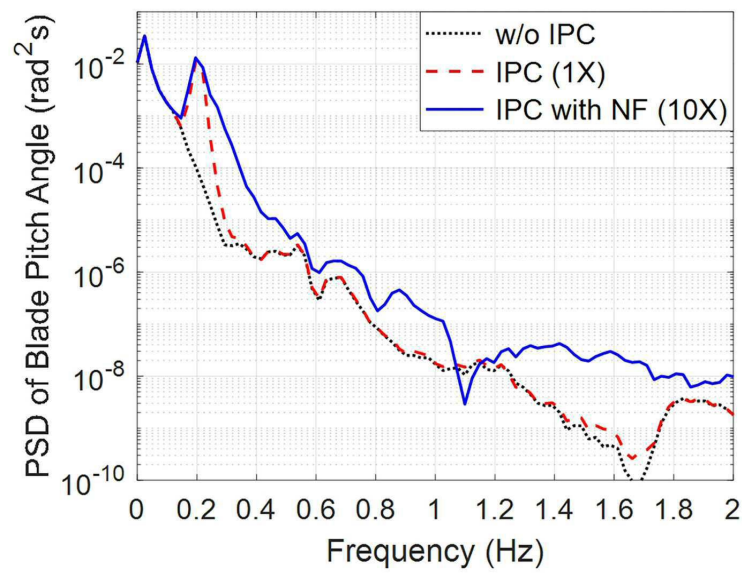
도면5



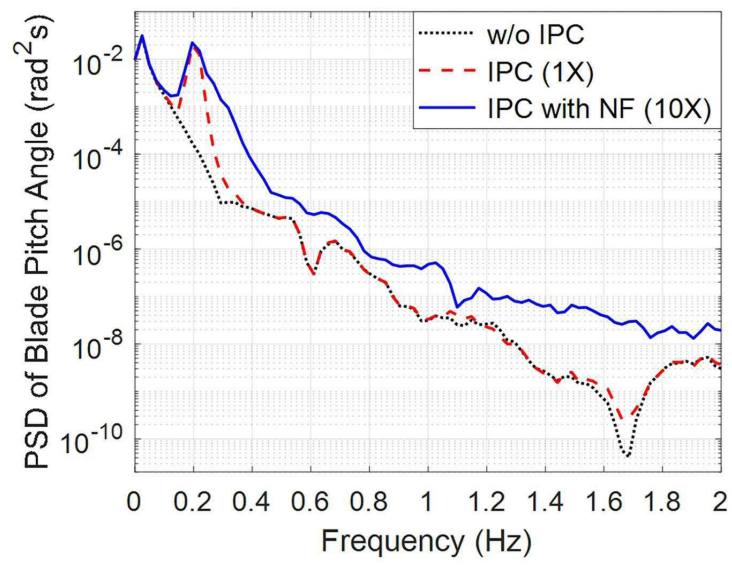
도면6



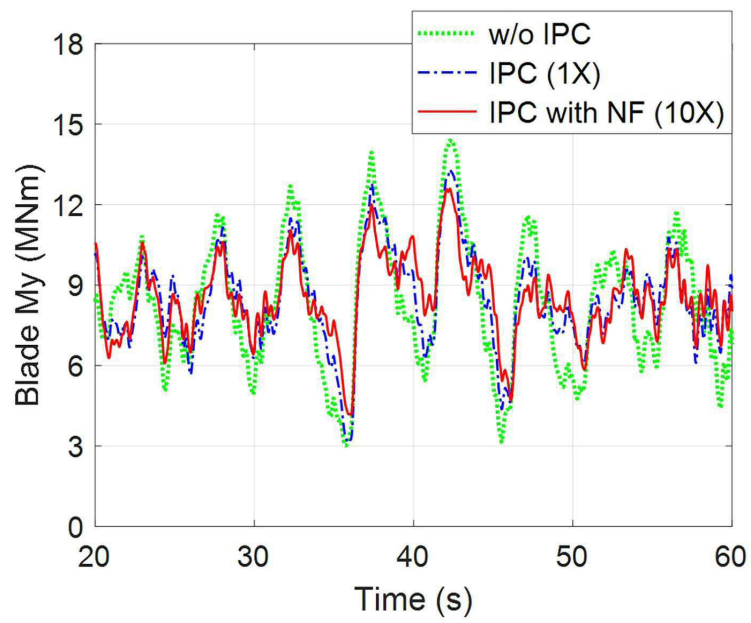
도면7



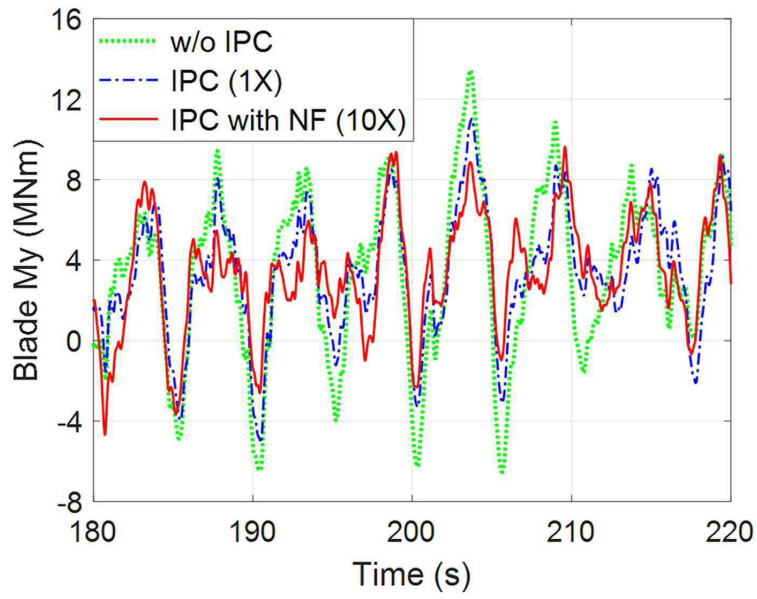
도면8



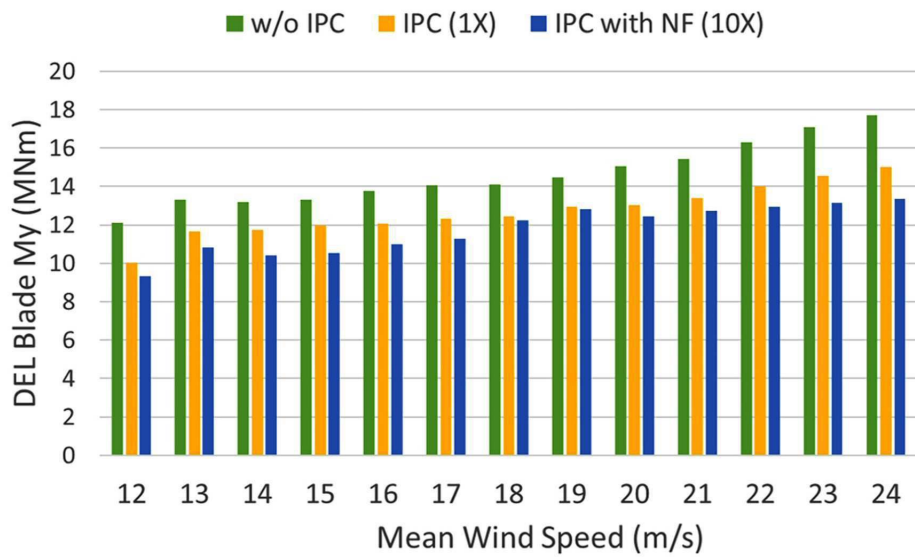
도면9



도면10



도면11



도면12

