(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2023년02월06일
(11) 등록번호 10-2494317
(24) 등록일자 2023년01월27일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
F03D 17/00 (2016.01)
(52) CPC특허분류
F03D 17/00 (2016.05)
F05B 2260/84 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2021-0101481
(22) 출원일자 2021년08월02일
심사청구일자 2021년08월02일
(56) 선행기술조사문헌
KR101734757 B1
JP2020139427 A

(73) 특허권자
한발대학교 산학협력단
대전광역시 유성구 동서대로 125 (덕명동)
(72) 발명자
임채욱
대전광역시 서구 월평동로 83, 다모아아파트 110동 1506호
(74) 대리인
특허법인 아이퍼스

전체 청구항 수 : 총 12 항 심사관 : 박종오

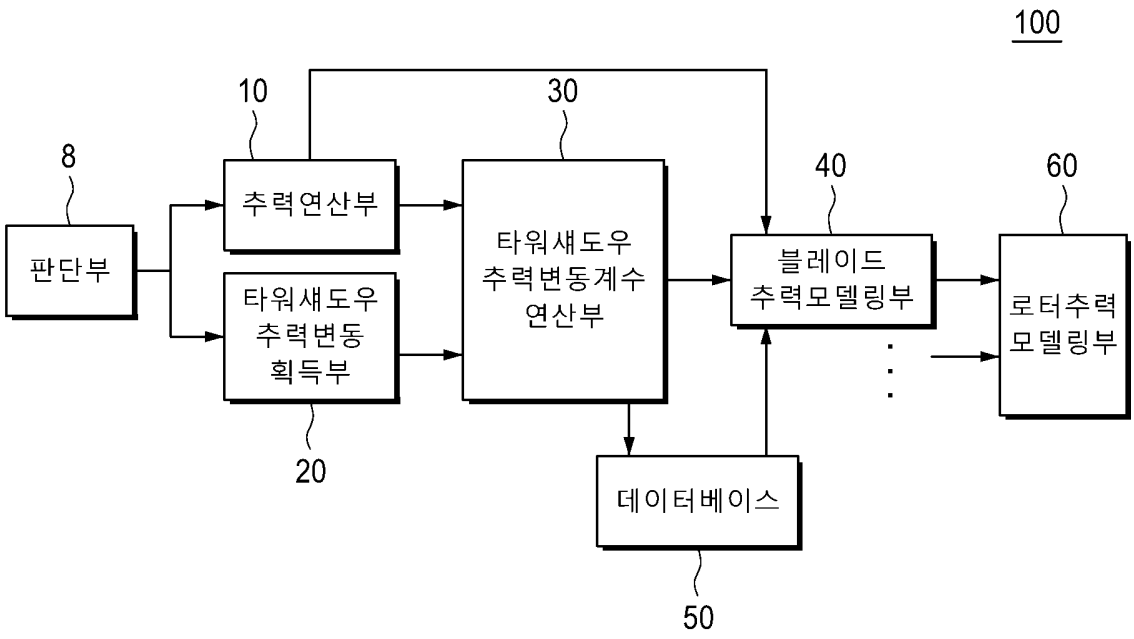
(54) 발명의 명칭 **정격풍속 이상에서 타워 섀도우에 의한 풍력터빈의 추력 동하중 모델링 방법 및 시스템**

(57) 요 약

본 발명은 정격풍속 이상에서 타워 섀도우에 의한 풍력터빈의 추력 모델링 방법 및 시스템에 관한 것으로, 보다 상세하게는 타워 섀도우가 없을 때의 풍력터빈 블레이드의 추력값을 연산하는 추력연산부; 타워 섀도우에 의해 변동하는 추력값을 획득하는 타워 섀도우 추력변동획득부; 상기 추력연산부에서 연산된 추력값과, 상기 타워 섀

(뒷면에 계속)

대 표 도 - 도2



도우 추력변동획득부에서 획득된 추력값을 기반으로 방위각과 피치각의 함수인 타워 섀도우 추력변동계수를 연산하는 타워 섀도우 추력변동계수 연산부; 상기 타워 섀도우 추력변동계수를 데이터베이스화하는 데이터베이스; 및 풍력터빈의 방위각과, 피치각에 기반하여 상기 데이터베이스에서 각 블레이드의 타워 섀도우 추력변동계수를 연산하고, 연산된 상기 타워 섀도우 추력변동계수와 상기 추력연산부에서 연산된 추력값을 이용하여 타워 섀도우에 의해 각 블레이드에 발생되는 추력변동에 의한 동하중을 모델링하는 블레이드 추력 모델링부;를 포함하는 것을 특징으로 하는 정격풍속 이상에서 타워 섀도우에 의한 풍력터빈의 추력 동하중 모델링 시스템에 관한 것이다.

(52) CPC특허분류
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

명 세 서

청구범위

청구항 1

정격풍속 이상에서 풍력터빈의 추력 동하중 모델링 시스템에 있어서,

타워 섀도우가 없을 때의 풍력터빈 블레이드의 추력값을 연산하는 추력연산부;

타워 섀도우에 의해 변동하는 추력값을 획득하는 타워 섀도우 추력변동획득부;

상기 추력연산부에서 연산된 추력값과, 상기 타워 섀도우 추력변동획득부에서 획득된 추력값을 기반으로 방위각과 피치각의 함수인 타워 섀도우 추력변동계수를 연산하는 타워 섀도우 추력변동계수 연산부;

상기 타워 섀도우 추력변동계수를 데이터베이스화하는 데이터베이스; 및

풍력터빈의 방위각과, 피치각에 기반하여 상기 데이터베이스에서 각 블레이드의 타워 섀도우 추력변동계수를 연산하고, 연산된 상기 타워 섀도우 추력변동계수와 상기 추력연산부에서 연산된 추력값을 이용하여 타워 섀도우에 의해 각 블레이드에 발생되는 추력변동에 의한 동하중을 모델링하는 블레이드 추력 모델링부;를 포함하는 것을 특징으로 하는 정격풍속 이상에서 타워 섀도우에 의한 풍력터빈의 추력 동하중 모델링 시스템.

청구항 2

제 1항에 있어서,

정격풍속 이상임을 구분하는 판단부; 및

상기 블레이드 추력 모델링부에 의해 모델링된 각 블레이드의 동하중 모델링을 기반으로 로터 추력 동하중을 모델링하는 로터추력 모델링부;를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 정격풍속 이상에서 타워 섀도우에 의한 풍력터빈의 추력 동하중 모델링 시스템.

청구항 3

제 1항에 있어서,

상기 타워 섀도우에 의한 풍속 변동은 이하의 수학식 1 및 수학식 2에 의해 정의되는 것을 특징으로 하는 정격풍속 이상에서 타워 섀도우에 의한 풍력터빈의 추력 동하중 모델링 시스템:

[수학식 1]

$$V(y,x) = V_h + v_{ts}(y,x)$$

[수학식 2]

$$v_{ts}(y,x) = V_h\left(\frac{D_t}{2}\right)^2 \frac{y^2 - x^2}{(x^2+y^2)^2}$$

상기 수학식 1, 2에서, V_h는 허브 높이에서의 평균 풍속, v_{ts}는 타워 섀도우에 의해 변동하는 풍속, D_t는 타워의 지름, x는 타워의 중심부터 타워 앞에 있는 블레이드 중심까지의 거리, y는 풍속이 통과하는 로터의 회전면에서의 타워 중심부터 블레이드까지의 횡 방향 거리이다.

청구항 4

제 3항에 있어서,

상기 추력연산부에 의해 연산되는 추력값은 이하의 수학식 5에 의해 연산되는 것을 특징으로 하는 정격풍속 이상에서 타워 섀도우에 의한 풍력터빈의 추력 동하중 모델링 시스템:

[수학식 5]

$$F_{Ti}(t) = \frac{\pi \rho R^2}{6} C_T(\lambda(t), \beta(t))\, V_m^2(t)$$

[수학식 6]

$$\lambda(t) = \frac{\Omega_r(t) R}{V_m(t)}$$

수학식 5에서, $V_m(t)$는 로터 허브에서의 풍속, $\beta(t)$는 블레이드의 피치각, $\lambda(t)$는 주속비로서 수학식 6으로 정의되고, $C_T(\lambda(t), \beta(t))$는 추력계수이고, 수학식 6에서 $\Omega_r(t)$는 로터의 회전 각속도이고, 수학식 5,6에서 R은 블레이드의 길이이다.

청구항 5

제 4항에 있어서,

상기 타워 섀도우 추력변동계수는 방위각과 피치각의 함수이며, 정격풍속 이상에서 상기 피치각 제어는 피치제어기의 전달함수에 기반하고,

상기 타워 섀도우 추력변동계수 연산부는 이하의 수학식 10에 의해 상기 타워 섀도우 추력변동계수를 연산하며,

상기 추력 모델링부는 이하의 수학식 9에 의해 타워 섀도우에 의해 블레이드에 발생되는 추력변동에 의한 동하중을 모델링하는 것을 특징으로 하는 정격풍속 이상에서 타워 섀도우에 의한 풍력터빈의 추력 동하중 모델링 시스템:

[수학식 9]

$$Ctv_{ts}(\theta, \beta) = \frac{F_{Ti,ts}(\theta, \lambda)}{F_{Ti}(\lambda)}$$

[수학식 10]

$$F_{Ti,ts}(t) = Ctv_{ts}(\theta(t), \beta(t)) \left[\frac{\pi \rho R^2}{6} C_T(\lambda(t), \beta(t))\, V_m^2(t) \right]$$

Θ는 방위각, β는 피치각, λ는 주속비이고,

수학식 9에서, $F_{Ti,ts}(\Theta, \lambda)$는 타워 섀도우 추력변동획득부에서 획득된 추력값이고, $F_{Ti}(\lambda)$는 상기 수학식 5에 의해 연산된 추력값이고,

수학식 10에서, $Ctv_{ts}(\theta, \beta)$는 타워 섀도우 추력변동계수이고, R은 블레이드의 길이이며, ρ는 공기밀도,

$C_T(\lambda(t),\beta(t))$는 추력계수이고, $V_m(t)$는 로터 허브에서의 풍속이다.

청구항 6

제 5항에 있어서,

상기 타워 섀도우 추력변동계수의 최대값은 최소값이 일어나는 로터 방위각에서 전후 30도 범위 내에서 각각에서 발생되는 것을 특징으로 하는 정격풍속 이상에서 타워 섀도우에 의한 풍력터빈의 추력 동하중 모델링 시스템.

청구항 7

제 6항에 있어서,

정격풍속 이상에서 상기 타워 섀도우 추력변동계수는 풍속의 증가에 따라 상기 최댓값은 증가되며 상기 최솟값은 감소되며 최소값의 감소폭은 최댓값의 증가폭보다 큰 것을 특징으로 하는 정격풍속 이상에서 타워 섀도우에 의한 풍력터빈의 추력 동하중 모델링 시스템.

청구항 8

제 7항에 있어서,

정격풍속 이상에서 상기 타워 섀도우 추력변동계수는 피치각 증가에 따라 상기 최댓값은 증가되며 상기 최솟값은 감소되며 최소값의 감소폭은 최댓값의 증가폭보다 큰 것을 특징으로 하는 정격풍속 이상에서 타워 섀도우에 의한 풍력터빈의 추력 동하중 모델링 시스템.

청구항 9

정격풍속 이상에서 풍력터빈의 추력 동하중 모델링 방법에 있어서,

추력연산부가 타워 섀도우가 없을 때의 풍력터빈 블레이드의 추력값을 연산하는 단계;

타워 섀도우 추력변동획득부가 타워 섀도우에 의해 변동하는 추력값을 획득하는 단계;

타워 섀도우 추력변동계수 연산부가 상기 추력연산부에서 연산된 추력값과, 상기 타워 섀도우 추력변동획득부에서 획득된 추력값을 기반으로 방위각과 피치각의 함수인 타워 섀도우 추력변동계수를 연산하는 단계;

상기 타워 섀도우 추력변동계수가 데이터베이스에 데이터베이스화되는 단계;

블레이드 추력 모델링부가, 풍력터빈의 방위각과, 피치각에 기반하여 상기 데이터베이스에서 각 블레이드의 타워 섀도우 추력변동계수를 연산하고, 연산된 상기 타워 섀도우 추력변동계수와 상기 추력연산부에서 연산된 추력값을 이용하여 타워 섀도우에 의해 각 블레이드에 발생되는 추력변동에 의한 동하중을 모델링하는 단계;를 포함하고,

상기 타워 섀도우에 의한 풍속 변동은 이하의 수학식 1 및 수학식 2에 의해 정의되고,

상기 추력연산부에 의해 연산되는 추력값은 이하의 수학식 5에 의해 연산되며,

상기 타워 섀도우 추력변동계수는 방위각과 피치각의 함수이며, 정격풍속 이상에서 상기 피치각 제어는 피치제어기의 전달함수에 기반하고,

상기 타워 섀도우 추력변동계수 연산부는 이하의 수학식 10에 의해 상기 타워 섀도우 추력변동계수를 연산하고,

상기 추력 모델링부는 이하의 수학식 9에 의해 타워 섀도우에 의해 블레이드에 발생되는 추력변동에 의한 동하중을 모델링하는 것을 특징으로 하는 정격풍속 이상에서 타워 섀도우에 의한 풍력터빈의 추력 동하중 모델링 방

법:

[수학식 1]

$$V(y,x) = V_h + v_{ts}(y,x)$$

[수학식 2]

$$v_{ts}(y,x) = V_h\left(\frac{D_t}{2}\right)^2 \frac{y^2 - x^2}{(x^2+y^2)^2}$$

[수학식 5]

$$F_{Ti}(t) = \frac{\pi\rho R^2}{6} C_T(\lambda(t),\beta(t))\, V_m^2(t)$$

[수학식 6]

$$\lambda(t) = \frac{\Omega_r(t) R}{V_m(t)}$$

[수학식 9]

$$Ctv_{ts}(\theta,\beta) = \frac{F_{Ti,ts}(\theta,\lambda)}{F_{Ti}(\lambda)}$$

[수학식 10]

$$F_{Ti,ts}(t) = Ctv_{ts}(\theta(t),\beta(t))\left[\frac{\pi\rho R^2}{6} C_T(\lambda(t),\beta(t))\, V_m^2(t)\right]$$

Θ는 방위각, β는 피치각, λ는 주속비이고,

상기 수학식 1, 2에서, V_h는 허브 높이에서의 평균 풍속, v_{ts}는 타워 섀도우에 의해 변동하는 풍속, D_t는 타워의 지름, x는 타워의 중심부터 타워 앞에 있는 블레이드 중심까지의 거리, y는 풍속이 통과하는 로터의 회전면에서의 타워 중심부터 블레이드까지의 횡 방향 거리이고,

수학식 5에서, $V_m(t)$는 로터 허브에서의 풍속, β(t)는 블레이드의 피치각, λ(t)는 주속비로서 수학식 6으로 정의되고, $C_T(\lambda(t),\beta(t))$는 추력계수이고, 수학식 6에서 $\Omega_r(t)$는 로터의 회전 각속도이며,

Θ는 방위각, β는 피치각, λ는 주속비이고,

수학식 9에서, $F_{Ti,ts}(\Theta,\lambda)$는 타워 섀도우 추력변동획득부에서 획득된 추력값이고, $F_{Ti}(\lambda)$는 상기 수학식 5에 의해 연산된 추력값이고,

수학식 10에서, $Ctv_{ts}(\theta,\beta)$는 타워 섀도우 추력변동계수이고, R은 블레이드의 길이이며, ρ는 공기밀도, $C_T(\lambda(t),\beta(t))$는 추력계수이고, $V_m(t)$는 로터 허브에서의 풍속이고, 수학식 5,6,10에서 R은 블레이드의 길이이다.

청구항 10

제 9항에 있어서,

상기 풍력터빈 블레이드의 추력값을 연산하는 단계 전에, 판단부가 정격풍속 이상임을 판단하는 단계;를 더 포함하고,

상기 각 블레이드에 발생되는 추력변동에 의한 동하중을 모델링하는 단계 후에, 로터추력 모델링부가 상기 블레이드 추력 모델링부에 의해 모델링된 각 블레이드의 동하중 모델링을 기반으로 로터 추력 동하중을 모델링하는 단계;를 더 포함하는 것을 특징으로 하는 정격풍속 이상에서 타워 섀도우에 의한 풍력터빈의 추력 동하중 모델링 방법.

청구항 11

제 9항에 있어서,

상기 타워 섀도우 추력변동계수의 최대값은 최소값이 일어나는 로터 방위각에서 전후 30도 범위 내에서 각각에서 발생되는 것을 특징으로 하는 정격풍속 이상에서 타워 섀도우에 의한 풍력터빈의 추력 동하중 모델링 방법.

청구항 12

제 11항에 있어서,

정격풍속 이상에서 상기 타워 섀도우 추력변동계수는 풍속의 증가에 따라 상기 최댓값은 증가되며 상기 최솟값은 감소되며 최소값의 감소폭은 최댓값의 증가폭보다 크고,

정격풍속 이상에서 상기 타워 섀도우 추력변동계수는 피치각 증가에 따라 상기 최댓값은 증가되며 상기 최솟값은 감소되며 최소값의 감소폭은 최댓값의 증가폭보다 큰 것을 특징으로 하는 정격풍속 이상에서 타워 섀도우에 의한 풍력터빈의 추력 동하중 모델링 방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 정격풍속 이상에서 타워 섀도우에 의한 풍력터빈의 추력 모델링 방법 및 시스템에 대한 것이다. 보다 상세하게는, 정격풍속 이상에서의 타워 섀도우 추력변동계수를 정의하여 이러한 타워 섀도우 추력변동계수를 이용하여 정격풍속 이상에서의 타워 섀도우에 의해 블레이드에 발생하는 추력변동 동하중을 모델링할 수 있는 방법 및 시스템에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 바람은 유용하게 이용할 수 있는 재생에너지 중 하나이다. 풍력터빈은 발전기의 기술적인 발전과 블레이드를 이용한 양력기술과 역사를 같이하고 있다. 풍력터빈은 바람이 가진 유용한 에너지를 로터 블레이드의 회전을 통하여 기계적 에너지로 전환하고, 발전기 제어를 통하여 전기를 생산하는 기계이다. 최근 풍력터빈은 대형화되는 추세로 수 MW급이 시장의 주류를 형성하고 있다

[0003] 도 1은 통상의 풍력터빈시스템(1)의 부분 사시도를 도시한 것이다. 도 1에 도시된 바와 같이, MW급 대형 풍력터빈시스템(1)은 블레이드(3), 허브(6), 로터(2), 기어박스(5), 타워(7), 베어링, 발전기(4), 피치시스템, 요잉시스템 등 다양한 부품들로 구성되어 있다.

[0004] 풍력터빈에서는 발전기의 제어를 통하여 생산되는 전기 파워의 질을 높이는 것도 중요하지만, 각 부품에 작용하는 정적 및 동적 하중에 대하여 20년의 내구성을 갖도록 설계 및 제작하는 것 또한 중요하다.

[0005] 풍력터빈이 대형화되면서 블레이드의 길이가 40~50미터 이상으로 길어지게 되어, 로터 블레이드가 회전할 때 블레이드에 발생하는 비대칭 하중이 증가하게 되었다. 윈드쉬어(Wind Shear), 타워새도우(Tower Shadow), 난류풍

속 등의 영향으로 블레이드에는 비대칭 하중이 발생한다. 이 비대칭 하중이 커지면 동적 하중이 증가하여 풍력터빈의 설계 시에 이를 반영해야 하며, 최근에는 이 비대칭 하중을 줄이기 위하여 세 개의 블레이드의 피치각을 독립적으로 제어하는 개별피치제어 방법을 적용하고 있다.

[0006] 타워 섀도우에 의해 블레이드에 작용하는 추력의 변동을 구하기 위해서는 양력계수와 항력계수와 같은 공력계수를 이용하여 블레이드의 길이 방향에 대하여 적분하는 BEM(Blade Element Momentum) 방법을 적용하면 된다. 블레이드에 작용하는 비대칭 동하중을 계산하기 위하여 지금까지의 연구들에서는 BEM 방법을 주로 적용하였다. Bladed와 같은 상용 소프트웨어에서도 BEM 방법을 적용하여 추력변동에 의한 비대칭 동하중을 계산하고 있다.

[0007] 풍력터빈의 추력은 일반적으로 공력계수의 정보를 이용하여 BEM 방법을 적용하여 계산할 수 있지만, 공력계수 정보 대신에 추력계수를 이용하여도 구할 수 있다. 풍력터빈의 추력 계산 시에 추력계수를 이용하는 것이 실용적이고 용이하지만, 추력계수를 이용한 추력 표현식을 적용하면 허브에서의 풍속 변화에 따른 추력의 변화만 표현할 뿐, 타워 섀도우 등에 의해 블레이드에 작용하는 비대칭 동하중에 의한 추력 변동을 표현할 수 없다. 타워 섀도우에 의한 추력의 변동은 일반적으로 BEM 방법을 적용하여 계산할 수 있는데, 기존의 추력계수를 이용한 추력 표현식을 적용하여도 동일하게 표현할 수 있다면 추력 변동의 모델이 유용할 것이다. 더 나아가 추력계수를 이용하여 타워 섀도우의 영향에 의한 추력변동을 표현할 수 있다면, 향후 이를 이용하여 타워 섀도우를 추정하거나 타워제어와 개별피치제어에 적용하기 위한 기초 기술이 될 수 있을 것이다.

선행기술문헌

특허문헌

[0008] (특허문헌 0001) 한국 공개특허 제2015-0126127호

(특허문헌 0002) 일본 공개특허 제2010-281297호

(특허문헌 0003) 한국 공개특허 제2014-0041223호

(특허문헌 0004) 일본 공개특허 제2009-114977호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0009] 따라서 본 발명은 상기와 같은 종래의 문제점을 해결하기 위하여 안출된 것으로서, 본 발명의 실시예에 따르면, 타워 섀도우 추력변동계수를 정의하여 이러한 타워 섀도우 추력변동계수를 이용하여 정격풍속 이상에서, 타워 섀도우에 의해 블레이드에 발생하는 추력변동 동하중을 간편하고 신속하게 모델링할 수 있는, 정격풍속 이상에서 타워 섀도우에 의한 풍력터빈 블레이드의 추력 동하중 모델링 방법 및 시스템을 제공하는데 그 목적이 있다.

[0010] 또한, 본 발명의 실시예에 따르면, 타워 섀도우에 대한 추력변동에 의한 동하중을 모델링하는데 있어, 공력계수를 이용한 BEM 방법이 아닌, 정의되는 타워 섀도우 추력변동계수와 추력계수를 이용하여 신속하고 효율적으로 타워 섀도우에 대한 추력변동을 모델링할 수 있는, 정격풍속 이상에서 타워 섀도우에 의한 풍력터빈 블레이드의 추력 동하중 모델링 방법 및 시스템을 제공하는데 그 목적이 있다.

[0011] 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

[0012] 본 발명의 제1목적은, 정격풍속 이상에서 풍력터빈의 추력 동하중 모델링 시스템에 있어서, 타워 섀도우가 없을 때의 풍력터빈 블레이드의 추력값을 연산하는 추력연산부; 타워 섀도우에 의해 변동하는 추력값을 획득하는 타워 섀도우 추력변동획득부; 상기 추력연산부에서 연산된 추력값과, 상기 타워 섀도우 추력변동획득부에서 획득된 추력값을 기반으로 방위각과 피치각의 함수인 타워 섀도우 추력변동계수를 연산하는 타워 섀도우 추력변동계수 연산부; 상기 타워 섀도우 추력변동계수를 데이터베이스화하는 데이터베이스; 및 풍력터빈의 방위각과, 피치각에 기반하여 상기 데이터베이스에서 각 블레이드의 타워 섀도우 추력변동계수를 연산하고, 연산된 상기 타워

섀도우 추력변동계수와 상기 추력연산부에서 연산된 추력값을 이용하여 타워 섀도우에 의해 각 블레이드에 발생되는 추력변동에 의한 동하중을 모델링하는 블레이드 추력 모델링부;를 포함하는 것을 특징으로 하는 정격풍속 이상에서 타워 섀도우에 의한 풍력터빈의 추력 동하중 모델링 시스템으로서 달성될 수 있다.

[0013] 그리고 정격풍속 이상임을 구분하는 판단부; 및 상기 블레이드 추력 모델링부에 의해 모델링된 각 블레이드의 동하중 모델링을 기반으로 로터 추력 동하중을 모델링하는 로터추력 모델링부;를 더 포함하는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0014] 또한 상기 타워 섀도우에 의한 풍속 변동은 이하의 수학식 1 및 수학식 2에 의해 정의되는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0015] [수학식 1]

[0016] $$V(y,x) = V_h + v_{ts}(y,x)$$

[0017] [수학식 2]

[0018] $$v_{ts}(y,x) = V_h\left(\frac{D_t}{2}\right)^2 \frac{y^2 - x^2}{(x^2+y^2)^2}$$

[0019] 상기 수학식 1, 2에서, V_h는 허브 높이에서의 평균 풍속, v_{ts}는 타워 섀도우에 의해 변동하는 풍속, D_t는 타워의 지름, x는 타워의 중심부터 타워 앞에 있는 블레이드 중심까지의 거리, y는 풍속이 통과하는 로터의 회전면에서의 타워 중심부터 블레이드까지의 횡 방향 거리이다.

[0020] 그리고 상기 추력연산부에 의해 연산되는 추력값은 이하의 수학식 5에 의해 연산되는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0021] [수학식 5]

[0022] $$F_{Ti}(t) = \frac{\pi\rho R^2}{6} C_T(\lambda(t),\beta(t))\, V_m^2(t)$$

[0023] [수학식 6]

[0024] $$\lambda(t) = \frac{\Omega_r(t) R}{V_m(t)}$$

[0025] 수학식 5에서, $V_m(t)$는 로터 허브에서의 풍속, $\beta(t)$는 블레이드의 피치각, $\lambda(t)$는 주속비로서 수학식 6으로 정의되고, $C_T(\lambda(t),\beta(t))$는 추력계수이고, 수학식 6에서 $\Omega_r(t)$는 로터의 회전 각속도이다.

[0026] 또한 상기 타워 섀도우 추력변동계수는 방위각과 피치각의 함수이며, 정격풍속 이상에서 상기 피치각 제어는 피치제어기의 전달함수에 기반하고, 상기 타워 섀도우 추력변동계수 연산부는 이하의 수학식 10에 의해 상기 타워 섀도우 추력변동계수를 연산하며, 상기 추력 모델링부는 이하의 수학식 9에 의해 타워 섀도우에 의해 블레이드에 발생되는 추력변동에 의한 동하중을 모델링하는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0027] [수학식 9]

[0028] $$Ctv_{ts}(\theta,\beta) = \frac{F_{Ti,ts}(\theta,\lambda)}{F_{Ti}(\lambda)}$$

[0029] [수학식 10]

[0030] $$F_{Ti,ts}(t) = Ctv_{ts}(\theta(t),\beta(t))\left[\frac{\pi\rho R^2}{6} C_T(\lambda(t),\beta(t))\, V_m^2(t)\right]$$

[0031] Θ는 방위각, β는 피치각, λ는 주속비이고,

[0032] 수학식 8에서, K_P는 비례제어게인, K_I는 적분제어게인이고,

[0033] 수학식 9에서, $F_{Ti,ts}(\Theta,\lambda)$는 타워 섀도우 추력변동획득부에서 획득된 추력값이고, $F_{Ti}(\lambda)$는 상기 수학식 5에 의해 연산된 추력값이고,

[0034] 수학식 10에서, $Ctv_{ts}(\theta,\beta)$는 타워 섀도우 추력변동계수이고, R은 블레이드의 길이이며, ρ는 공기밀도, $C_T(\lambda(t),\beta(t))$는 추력계수이고, $V_m(t)$는 로터 허브에서의 풍속이다.

[0035] 그리고 상기 타워 섀도우 추력변동계수의 최대값은 최소값이 일어나는 로터 방위각에서 전후 30도 범위 내에서 각각에서 발생되는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0036] 또한 정격풍속 이상에서 상기 타워 섀도우 추력변동계수는 풍속의 증가에 따라 상기 최댓값은 증가되며 상기 최솟값은 감소되며 최소값의 감소폭은 최댓값의 증가폭보다 큰 것을 특징으로 할 수 있다.

[0037] 그리고 정격풍속 이상에서 상기 타워 섀도우 추력변동계수는 피치각 증가에 따라 상기 최댓값은 증가되며 상기 최솟값은 감소되며 최소값의 감소폭은 최댓값의 증가폭보다 큰 것을 특징으로 할 수 있다.

[0038] 본 발명의 제2목적은, 정격풍속 이상에서 풍력터빈의 추력 동하중 모델링 방법에 있어서, 추력연산부가 타워 섀도우가 없을 때의 풍력터빈 블레이드의 추력값을 연산하는 단계; 타워 섀도우 추력변동획득부가 타워 섀도우에 의해 변동하는 추력값을 획득하는 단계; 타워 섀도우 추력변동계수 연산부가 상기 추력연산부에서 연산된 추력값과, 상기 타워 섀도우 추력변동획득부에서 획득된 추력값을 기반으로 방위각과 피치각의 함수인 타워 섀도우 추력변동계수를 연산하는 단계; 상기 타워 섀도우 추력변동계수가 데이터베이스에 데이터베이스화되는 단계; 블레이드 추력 모델링부가, 풍력터빈의 방위각과, 피치각에 기반하여 상기 데이터베이스에서 각 블레이드의 타워 섀도우 추력변동계수를 연산하고, 연산된 상기 타워 섀도우 추력변동계수와 상기 추력연산부에서 연산된 추력값을 이용하여 타워 섀도우에 의해 각 블레이드에 발생되는 추력변동에 의한 동하중을 모델링하는 단계;를 포함하고, 상기 타워 섀도우에 의한 풍속 변동은 이하의 수학식 1 및 수학식 2에 의해 정의되고, 상기 추력연산부에 의해 연산되는 추력값은 이하의 수학식 5에 의해 연산되며, 상기 타워 섀도우 추력변동계수는 방위각과 피치각의 함수이며, 정격풍속 이상에서 상기 피치각 제어는 피치제어기의 전달함수에 기반하고, 상기 타워 섀도우 추력변동계수 연산부는 이하의 수학식 10에 의해 상기 타워 섀도우 추력변동계수를 연산하고, 상기 추력 모델링부는 이하의 수학식 9에 의해 타워 섀도우에 의해 블레이드에 발생되는 추력변동에 의한 동하중을 모델링하는 것을 특징으로 하는 정격풍속 이상에서 타워 섀도우에 의한 풍력터빈의 추력 동하중 모델링 방법으로서 달성될 수 있다.

[0039] [수학식 1]

[0040] $$V(y,x) = V_h + v_{ts}(y,x)$$

[0041] [수학식 2]

[0042] $$v_{ts}(y,x) = V_h\left(\frac{D_t}{2}\right)^2 \frac{y^2 - x^2}{(x^2+y^2)^2}$$

[0043] [수학식 5]

$$F_{Ti}(t) = \frac{\pi \rho R^2}{6} C_T(\lambda(t), \beta(t)) V_m^2(t)$$

[0044]

[0045] [수학식 6]

$$\lambda(t) = \frac{\Omega_r(t) R}{V_m(t)}$$

[0046]

[0047] [수학식 9]

$$Ctv_{ts}(\theta, \beta) = \frac{F_{Ti,ts}(\theta, \lambda)}{F_{Ti}(\lambda)}$$

[0048]

[0049] [수학식 10]

$$F_{Ti,ts}(t) = Ctv_{ts}(\theta(t), \beta(t)) \left[\frac{\pi \rho R^2}{6} C_T(\lambda(t), \beta(t)) V_m^2(t) \right]$$

[0050]

[0051] Θ는 방위각, β는 피치각, λ는 주속비이고,

[0052] 상기 수학식 1, 2에서, V_h는 허브 높이에서의 평균 풍속, v_{ts}는 타워 섀도우에 의해 변동하는 풍속, D_t는 타워의 지름, x는 타워의 중심부터 타워 앞에 있는 블레이드 중심까지의 거리, y는 풍속이 통과하는 로터의 회전면에서의 타워 중심부터 블레이드까지의 횡 방향 거리이고, 수학식 5에서, $V_m(t)$는 로터 허브에서의 풍속, β(t)는 블레이드의 피치각, λ(t)는 주속비로서 수학식 6으로 정의되고, $C_T(\lambda(t), \beta(t))$는 추력계수이고, 수학식 6에서 $\Omega_r(t)$는 로터의 회전 각속도이며, Θ는 방위각, β는 피치각, λ는 주속비이고, 수학식 8에서, K_P는 비례제어게인, K_I는 적분제어게인이고, 수학식 9에서, $F_{Ti,ts}(\Theta, \lambda)$는 타워 섀도우 추력변동획득부에서 획득된 추력값이고, $F_{Ti}(\lambda)$는 상기 수학식 5에 의해 연산된 추력값이고, 수학식 10에서, $Ctv_{ts}(\theta, \beta)$는 타워 섀도우 추력변동계수이고, R은 블레이드의 길이이며, ρ는 공기밀도, $C_T(\lambda(t), \beta(t))$는 추력계수이고, $V_m(t)$는 로터 허브에서의 풍속이다.

[0053] 그리고 상기 풍력터빈 블레이드의 추력값을 연산하는 단계 전에, 판단부가 정격풍속 이상임을 판단하는 단계;를 더 포함하고, 상기 각 블레이드에 발생되는 추력변동에 의한 동하중을 모델링하는 단계 후에, 로터추력 모델링부가 상기 블레이드 추력 모델링부에 의해 모델링된 각 블레이드의 동하중 모델링을 기반으로 로터 추력 동하중을 모델링하는 단계;를 더 포함하는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0054] 또한 상기 타워 섀도우 추력변동계수의 최대값은 최소값이 일어나는 로터 방위각에서 전후 30도 범위 내에서 각각에서 발생되는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0055] 그리고 정격풍속 이상에서 상기 타워 섀도우 추력변동계수는 풍속의 증가에 따라 상기 최댓값은 증가되며 상기 최솟값은 감소되며 최소값의 감소폭은 최댓값의 증가폭보다 크고, 정격풍속 이상에서 상기 타워 섀도우 추력변동계수는 피치각 증가에 따라 상기 최댓값은 증가되며 상기 최솟값은 감소되며 최소값의 감소폭은 최댓값의 증가폭보다 큰 것을 특징으로 할 수 있다.

발명의 효과

[0056] 본 발명의 실시예에 따른 정격풍속 이상에서 타워 섀도우에 의한 풍력터빈 블레이드의 추력 동하중 모델링 방법

및 시스템에 따르면, 타워 섀도우 추력변동계수를 정의하여 이러한 타워 섀도우 추력변동계수를 이용하여 정격 풍속 이상에서, 타워 섀도우에 의해 블레이드에 발생하는 추력변동 동하중을 간편하고 신속하게 모델링할 수 있는 효과를 갖는다.

[0057] 또한, 본 발명의 실시예에 따른 정격풍속 이상에서 타워 섀도우에 의한 풍력터빈 블레이드의 추력 동하중 모델링 방법 및 시스템에 따르면, 타워 섀도우에 대한 추력변동에 의한 동하중을 모델링하는데 있어, 공력계수를 이용한 BEM 방법이 아닌, 정의되는 타워 섀도우 추력변동계수와 추력계수를 이용하여 신속하고 효율적으로 타워 섀도우에 대한 추력변동을 모델링할 수 있는 효과를 갖는다.

[0058] 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

[0059] 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 통상의 풍력터빈시스템의 부분 사시도,

도 2는 본 발명의 실시예에 따른 타워 섀도우에 의한 풍력터빈의 추력 모델링 시스템의 구성을 나타낸 블록도,

도 3a 및 도 3b는 본 발명의 실시예에 따른 타워 섀도우에 의한 풍력터빈의 추력 모델링 방법의 흐름도,

도 4는 포텐셜 흐름 모델의 개략도,

도 5는 2MW 풍력터빈 데모 모델의 물리적인 파라미터값 표,

도 6은 풍속에 따른 피치각의 정상상태 값 그래프,

도 7은 타워 섀도우가 없는 경우에 대하여 풍속(4 ~ 25m/s, 정격풍속 11m/s)에서 풍속에 따른 블레이드 하나에서의 추력 그래프,

도 8은 허브에서의 풍속이 16m/s인 경우 방위각에 따른 타워 섀도우에 의한 추력의 변동 그래프,

도 9는 풍속이 16m/s인 경우 방위각에 따른 타워 섀도우 추력 변동계수 그래프,

도 10은 타워 섀도우가 있는 경우 정격 이상의 풍속(12 ~ 25m/s)에서 풍속에 따른 타워 섀도우 추력 변동계수의 최대값, 최소값 그래프,

도 11은 타워 섀도우가 있는 경우 정격 이상의 풍속에서 피치각에 따른 타워 섀도우 추력 변동계수의 최대값, 최소값 그래프,

도 12는 타워 섀도우가 있는 경우, 피치각과 방위각에 따른 섀도우 추력 변동계수,

도 13은 본 발명의 실시예에 따른 정격풍속 이상에서 타워 섀도우에 의한 풍력터빈의 추력 모델링 시스템의 구성을 나타낸 블록도,

도 14 및 도 15는 풍속 16m/s인 경우 타워 섀도우 영향으로 인해 세 블레이드에서 발생하는 추력변동(도 14)과, 로터 허브에서 발생하는 추력변동(도 15)에 대한 수치실험 결과를 도시한 것이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0060] 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.

[0061] 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.

[0062] 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.

[0063] 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 추가를 배제하지 않는다.

[0064] 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.

[0065] 이하에서는 본 발명에서는 추력계수를 이용한 추력 표현식을 적용할 때 타워 섀도우에 의해 블레이드에 발생하는 추력변동 동하중을 표현하는 방법에 대하여 제시한다. 이를 위하여 “타워 섀도우 추력변동 계수”를 정의 및 도입하고, 2MW 풍력터빈을 대상으로 정격이하의 풍속에서 “타워 섀도우 추력변동 계수”를 구하고 분석한 후 Matlab/Simulink에서 타워 섀도우 동하중 모델을 구현하고 검증한다.

[0066] 이하에서는 본 발명의 실시예에 따른 타워 섀도우에 의한 풍력터빈의 추력 동하중 모델링 시스템(100)의 구성, 기능 그리고, 모델링 방법에 대해 설명하도록 한다. 먼저, 도 2는 본 발명의 실시예에 따른 타워 섀도우에 의한 풍력터빈의 추력 동하중 모델링 시스템(100)의 구성을 나타낸 블록도를 도시한 것이다. 그리고, 도 3a 및 도 3b는 본 발명의 실시예에 따른 타워 섀도우에 의한 풍력터빈의 추력 동하중 모델링 방법의 흐름도를 도시한 것이다.

[0067] 본 발명의 실시예에 따른 정격풍속 이상에서 타워 섀도우에 의한 풍력터빈의 추력 동하중 모델링 시스템(100)은 정의되는 타워 섀도우 추력변동계수와 추력계수를 이용하여 기존 공력계수를 이용한 BEM 방법을 적용하는 것보다 신속하고 효율적으로 타워 섀도우가 고려된 각 블레이드와 로터의 추력을 모델링할 수 있게 된다.

[0068] 이러한 본 발명의 실시예에 따른 정격풍속 이상에서 타워 섀도우에 의한 풍력터빈의 추력 동하중 모델링 시스템(100)은, 도 2에 도시된 바와 같이, 판단부(8), 추력연산부(10)와, 타워 섀도우 추력변동획득부(20)와, 타워 섀도우 추력변동계수 연산부(30)와, 블레이드 추력 모델링부(40)와, 데이터베이스(50)와, 로터 추력 모델링부(60) 등을 포함하여 구성될 수 있음을 알 수 있다.

[0069] 도 3a는 본 발명의 실시예에 따른 타워 섀도우 추력변동계수를 데이터베이스화하는 방법에 대한 흐름도를 도시한 것이고, 도 3b는 본 발명의 실시예에 따라 데이터베이스에 저장된 타워 섀도우 추력변동계수와 추력연산부(10)에서 연산되는 추력값을 기반으로 타워 섀도우에 의해 블레이드에 발생되는 추력변동에 의한 동하중과 로터에서 발생되는 추력변동에 의한 동하중을 모델링하는 방법의 흐름도를 도시한 것이다.

[0070] 본 발명의 실시예에 따른 정격풍속 이상에서 타워 섀도우에 의한 풍력터빈의 추력 동하중 모델링 시스템(100)은 먼저, 판단부(8)에 의해 정격풍속 이상임을 판단하게 된다(S0). 이러한 정격 풍속이상으로 판단하는 것은, 구체적실시예에서 블레이드의 피치각이 파인피치각(예를 들어, 0도)보다 크면 정격풍속 이상으로 판단하게 된다.

[0071] 추력연산부(10)는 후에 상세하게 설명되는 바와 같이, 추력계수를 이용하여, 타워 섀도우가 없을 때의 풍력터빈 블레이드의 추력값을 연산하고(S1), 타워 섀도우 추력변동획득부(20)는 타워 섀도우에 의해 변동하는 추력값을 획득하게 된다(S2).

[0072] 그리고, 타워 섀도우 추력변동계수 연산부(30)는 후에 상세히 설명되는 바와 같이, 추력연산부(10)에서 연산된

추력값과, 타워 섀도우 추력변동획득부(20)에서 획득된 추력값을 기반으로 방위각과 피치각의 함수인 타워 섀도우 추력변동계수를 연산하게 된다(S3). 그리고, 데이터베이스(50)는 추력계수와 연산된 타워 섀도우 추력변동계수를 저장하여 데이터베이스화하게 된다(S4).

[0073] 그리고, 모델링방법은 도 3b에 도시된 바와 같이, 추력연산부(10)는 추력계수를 이용하여, 타워 섀도우가 없을 때의 풍력터빈 블레이드의 추력값을 연산하고(S11), 데이터베이스(50)로부터 타워 섀도우 추력변동계수를 결정하고(S12), 추력 모델링부(40)는 추력연산부(10)에서 연산되는 타워 섀도우가 없을 때의 풍력터빈 블레이드의 추력값(S11)과, 데이터베이스(50)에서 결정된 타워 섀도우 추력변동계수를 이용하여 타워 섀도우에 의해 블레이드에 발생되는 추력변동에 의한 동하중을 모델링하게 된다(S13). 즉, 블레이드 추력 모델링부(40)는 풍력터빈의 방위각과, 피치각에 기반하여 데이터베이스(50)에서 각 블레이드의 타워 섀도우 추력변동계수를 연산하고, 연산된 타워 섀도우 추력변동계수와 추력연산부(10)에서 연산된 추력값을 이용하여 타워 섀도우에 의해 각 블레이드에 발생되는 추력변동에 의한 동하중을 모델링하게 된다.

[0074] 그리고 로터추력 모델링부(60)는 블레이드 추력 모델링부(40)에 의해 모델링된 각 블레이드의 동하중 모델링을 기반으로 로터 추력 동하중을 모델링하게 된다(S14).

[0075] 이하에서는 공력계수를 이용한 기존 BEM 방법과, 종래 추력계수를 이용한 추력 연산방법에 대해 설명한 후, 본 발명의 실시예에 따른 정격풍속 이상에서 타워 섀도우에 의한 풍력터빈 블레이드의 추력 모델링을 보다 상세하게 설명하도록 한다.

[0076] 먼저, 풍력터빈에서 발생하는 타워 섀도우는 바람과 타워의 간섭에 의한 것이다. 바람이 풍력터빈으로 불어 들어오면 블레이드를 거친 후에 타워를 거쳐 지나가게 된다. 이때 타워는 바람의 흐름을 방해하게 되고, 타워를 지나는 지점의 풍속에 변화를 주게 된다. 이에 따라 타워 섀도우에 의해 추력의 변동이 발생하고 블레이드에는 동하중이 발생하게 된다. 로터가 회전할 때 타워 섀도우에 의해 블레이드에 발생하는 하중은 로터 회전각에 따라 달라진다. 세 블레이드는 로터에 120도 간격으로 결합되어 있으므로 세 블레이드에는 비대칭 하중이 발생하게 된다.

[0077] 타워 섀도우에 의한 풍속의 변동을 계산하기 위한 방법으로는 대표적으로 포텐셜 흐름 모델(potential flow model), 타워 섀도우 결손 모델(tower-shadow-deficit model), 실증 모델(empirical model)이 있다. 특히 전방향형(upwind) 풍력터빈에 대하여 풍속의 변동을 계산할 때에는 포텐셜 흐름 모델을 적용할 경우 더 정확한 결과를 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 전방향형 2MW 풍력터빈 대상으로 포텐셜 흐름 모델을 적용하여 수치실험을 진행하였다

[0078] 도 4는 포텐셜 흐름 모델의 개략도이고, 포텐셜 흐름 모델에서 타워 섀도우에 의한 풍속의 변동은 수학식 1과 수학식 2로 표현된다.

[0079] [수학식 1]

[0080] $$V(y,x) = V_h + v_{ts}(y,x)$$

[0081] [수학식 2]

[0082] $$v_{ts}(y,x) = V_h\left(\frac{D_t}{2}\right)^2 \frac{y^2 - x^2}{(x^2+y^2)^2}$$

[0083] 수학식 1, 2에서, V_h는 허브 높이에서의 평균 풍속을 뜻하며, v_{ts}는 타워 섀도우에 의해 변동하는 풍속을 뜻하고, D_t는 타워의 지름, x는 타워의 중심부터 타워 앞에 있는 블레이드 중심까지의 거리를 뜻한다. y는 풍속이 통과하는 로터의 회전면에서의 타워 중심부터 블레이드까지의 횡 방향 거리를 뜻한다.

[0084] 타워 섀도우가 고려되지 않은 경우에는 블레이드의 길이에 따라서 풍속은 변동이 없이 일정하며 허브 높이에서의 풍속과 같다. 하지만 타워 섀도우가 고려된 경우에는 블레이드의 길이와 로터 회전 시 변화하는 로터 방위각에 따라서 거리 y가 달라지기 때문에 풍속의 변동이 발생한다. 이로 인해서 타워 섀도우가 고려된 경우에는 로터 회전 시 로터 방위각이 변화함에 따라 각각 세 블레이드에는 풍속 변동에 의한 추력의 변동이 발생하게 된다. 또한 세 블레이드는 각각 120도의 위상차가 존재하기 때문에 로터 회전 시 로터 방위각이 변화함에 따라

블레이드마다 각기 다른 비대칭 하중이 유발하게 된다.

[0085] 풍력터빈이 바람에 의해 후방으로 밀리는 힘인 추력(FT)은 BEM(Blade Element Momentum) 방법을 이용하여 계산이 가능하다. 바람이 불어 풍력터빈의 로터-블레이드가 회전할 때 블레이드 단면에 작용하는 공력은 블레이드 익형의 양력계수(C_l)와 항력계수(C_d)의 함수이다. 블레이드 익형의 각 단면에서 발생하는 양력과 항력의 성분은 공력 토크와 추력을 발생시킨다. 블레이드 하나에서 발생하는 전체 추력은 블레이드 각 단면에서 발생하는 추력을 블레이드 길이에 따라 적분함으로 얻을 수 있는데 수학식 3과 같이 표현된다.

[0086] [수학식 3]

$$F_{Ti} = \frac{\rho c}{2}\int_0^R V_{rel}^2 \left(C_l \cos\phi + C_d \sin\phi\right) dr$$

[0087]

[0088] 여기서 ρ는 공기밀도, c는 익형 시위선의 길이, Vrel는 익형 앞전에서의 상대속도, ϕ는 익형 받음각과 블레이드 피치각의 합이다.

[0089] 블레이드가 세 개인 풍력터빈의 경우 로터 허브에 작용하는 전체 추력은 각 블레이드의 추력(F_{Ti})의 합으로 수학식 4와 같이 표현된다.

[0090] [수학식 4]

$$F_T(t) = F_{T_1}(t) + F_{T_2}(t) + F_{T_3}(t)$$

[0091]

[0092] 타워 섀도우가 없는 경우에는 블레이드가 세 개인 풍력터빈의 로터 허브 작용하는 전체 추력은 블레이드 하나에 작용하는 추력인 수학식 3을 세 배하면 된다. 타워 섀도우가 없는 경우에는 풍속이 블레이드 길이에 따라서 일정하다. 그러나 타워 섀도우를 고려하면 풍속은 블레이드 길이에 따라 다르고 또한 로터의 회전각에 따라서 다르기 때문에, 각 블레이드에는 서로 다른 비대칭 하중이 작용하게 된다.

[0093] 회전날개의 형상과 블레이드 익형에 관한 공력 특성이 알려져 있다면 수학식 3으로부터 추력계수(C_T)를 계산할 수 있다. 바람에 의해 블레이드 하나에서 발생하는 풍력터빈의 추력은 수학식 5와 같이 표현되는데, 풍속뿐만 아니라 주속비와 피치각에 대하여 비선형적으로 표현된다. 본 발명의 실시예에 따른 추력연산부(에 의해 연산되는 추력값은 이하의 수학식 5에 의해 연산되게 된다.

[0094] [수학식 5]

$$F_{Ti}(t) = \frac{\pi \rho R^2}{6} C_T(\lambda(t), \beta(t))\, V_m^2(t)$$

[0095]

[0096] 여기서 V_m은 로터 허브에서의 풍속, β는 블레이드의 피치각, λ는 주속비로 수학식 6과 같이 정의된다. 그리고 C_T는 추력계수로 수학식 3과 4의 BEM 방법에서의 추력(FT) 표현을 $\rho\pi R^2 V_m^2/2$로 나눔으로 수학식 7과 같이 정의되며, 블레이드의 각 단면에서의 익형의 양력계수, 항력계수, 형상 등이 주어져야 계산이 가능하다.

[0097] [수학식 6]

$$\lambda(t) = \frac{\Omega_r(t) R}{V_m(t)}$$

[0098]

[0099] 수학식 6에서 $\Omega_r(t)$는 로터의 회전 각속도이다.

[0100] [수학식 7]

$$C_T(\lambda,\beta) = \frac{F_T}{\rho\pi R^2 V_m^2/2} = \frac{3c\int_0^R V_{rel}^2\left(C_l\cos\phi + C_d\sin\phi\right)dr}{\pi R^2 V_m^2}$$

[0101]

[0102] 블레이드가 세 개인 풍력터빈의 경우 로터 허브에 작용하는 전체 추력은 각 블레이드의 추력(FTi)의 합으로 수학식 4와 같이 동일하게 표현된다. 타워 섀도우가 없는 경우 블레이드가 세 개인 풍력터빈에 작용하는 전체 추력은 블레이드 하나에 작용하는 추력인 수학식 5를 세 배하면 된다. 그러나 타워 섀도우가 있는 경우의 풍속은 블레이드 길이에 따라 다르고 또한 로터의 회전각에 따라서 다르기 때문에, 수학식 5를 이용하여 각 블레이드에 작용하는 서로 다른 비대칭 하중을 계산할 수 없다.

[0103] 이하에서는 현장에 적용되는 2MW 풍력터빈 시스템에서 타워 섀도우에 의한 추력 특정을 살펴보도록 한다. GL Garrad Hassan의 Bladed S/W에서는 2MW 풍력터빈 데모 모델을 제공하고 있다. Bladed S/W에서는 블레이드, 로터, 타워, 파워 트레인 등 풍력터빈의 각 구성요소들을 표현할 수 있는 창들이 있는데, 거기에서 제시된 2MW 풍력터빈 데모 모델의 물리적인 파라미터값들을 정리하면 도 5와 같다. 최적 주속비 구간의 풍속은 5.3~9.3m/s이고 정격풍속은 11.3m/s이다. 풍력터빈의 출력계수(C_P)는 최적 주속비(λ_{opt})가 8.1일 때 최대값($C_{P,max}$)이 0.4662이다.

[0104] 풍력터빈은 풍속과 블레이드의 상호작용이 비선형적인 특성을 가져 풍속에 따른 작동점이 제어기의 동특성에 영향을 받으므로, 토크 제어기와 피치 제어기의 설계가 우선적으로 고려되어야 한다. 정격풍속 이상에서는 발전기의 토크 크기는 정격토크 값으로 일정하게 유지된다.

[0105] 피치 제어기는 정격풍속 이상에서 정격출력을 유지하기 위한 목적으로 작동한다. 피치 제어기는 PI 제어기가 많이 이용되는데, 발전기 회전속도를 피드백 받아 발전기 정격 회전속도와의 오차를 줄이도록 블레이드의 피치각(β)을 계산한다. 수학식 8은 피치 PI 제어기의 전달함수 C(s)을 나타내고 있는데, 비례 제어 게인(K_P)과 적분 제어 게인(K_I)으로 구성되어 있다. 또한 피치 제어기에서는 일반적으로 고풍속이 될수록 피치 제어기의 게인값을 작게 사용하도록 하는 피치 게인 스케쥴러를 사용한다. 이는 고풍속이 될수록 블레이드의 피치각 변화에 대한 공력 토크의 변화가 커져 피치 제어기의 응답 속도가 더욱 빨라지기 때문이다.

[0106] [수학식 8]

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

[0107]

[0108] 전 풍속 구간에서 피치각의 정상상태 값은 도 6과 같다. 정격풍속 이하에서는 최대의 출력을 얻기 위하여 피치각은 0도로 일정하다. 그러나 정격풍속 이상에서는 정격출력을 유지하기 위하여 풍속이 커짐이 따라 피치각은 비선형적으로 증가한다.

[0109] 타워 섀도우가 없는 경우 풍력터빈의 세 개의 블레이드에 작용하는 추력은 모두 같고 각 블레이드의 추력이 합해져서 로터 허브에 추력을 발생시킨다. 앞에서 설명한 피치 제어기를 적용하여 로터 허브에서의 풍속에 따른 각 블레이드에서의 추력의 크기를 BEM(Blade Element Momentum)방법을 이용하여 계산하였다. 도 7은 타워 섀도우가 없는 경우에 대하여 풍속(4 ~ 25m/s)에서 풍속에 따른 블레이드 하나에서의 추력의 정상상태 값을 보여주고 있는데, 정격풍속 이하(4~11m/s)에서는 피치각의 변화가 없으므로 풍속이 커짐에 따라 추력이 증가하는 것을 확인할 수 있으나, 정격풍속 이상(12~25m/s)에서는 풍속이 커짐에 따라 블레이드의 피치각이 증가하여(도 6 참고) 추력이 오히려 감소하는 것을 확인할 수 있다.

[0110] 타워 섀도우가 있는 경우 풍력터빈의 세 개의 블레이드에 작용하는 추력은 시간에 따라 모두 다르고 각 블레이드에 작용하는 추력에 변동이 발생한다. 로터가 회전할 때 각 블레이드의 추력은 로터의 회전각에 따라서 변동하게 된다. 앞에서 설명한 피치 제어기를 적용하여 로터 허브에서의 풍속에 따른 각 블레이드에서의 추력의 크기를 BEM방법을 이용하여 계산하였다.

[0111] 도 8은 허브에서의 풍속이 16m/s인 경우 타워 섀도우에 의한 추력의 변동을 보여주고 있다. 타워 섀도우에 의한 추력 변동의 최소값은 로터의 회전 방위각(Θ)이 180도일 때 나타남을 확인할 수 있고, 추력 변동의 최대값은 최소값이 일어나는 로터 방위각 180도에서 전후 약 20도(약 160도와 200도)부근에서 발생함을 확인할 수 있다.

[0112] 추력계수를 이용하는 수학식 5는 허브에서의 풍속의 변화에 따른 추력의 변화를 표현할 뿐이다. 수학식 5를 사용할 경우 허브에서의 풍속이 일정할 경우 평균 풍속에 대한 블레이드 하나에 작용하는 추력의 정상상태 값을 구할 수 있다.

[0113] 그러나 추력계수를 이용하는 수학식 5는 타워 섀도우가 있는 경우 타워 섀도우에 의한 추력의 변동을 표현할 수 없다. 본 발명의 실시예에서는 추력계수를 이용하는 수학식 5를 기반으로 정격풍속 이상에서 타워 섀도우에 대한 추력의 변동을 표현하고자 한다.

[0114] 수학식 10과 같이 무차원 파라미터인 “타워 섀도우 추력변동 계수(Ctv_{ts})”를 도입하여 타워 섀도우 동하중 모델을 표현하는 방법을 제안하고자 한다.

[0115] “타워 섀도우 추력변동 계수(Ctv_{ts})”는 수학식 9와 같이 타워 섀도우에 의해 변동하는 추력값($F_{Ti,ts}$)을 타워 섀도우가 없을 때의 추력값(F_{Ti})으로 나눈 비로 정의하고자 한다. 피치각이 풍속의 크기에 따라 변동하는 정격풍속 이상인 경우 “타워 섀도우 추력변동 계수(Ctv_{ts})”는 로터의 회전 방위각(Θ)과 피치각(β)의 함수로 단순화하여 표현할 수 있다. 이는 로터의 회전 방위각과 주속비의 함수로 표현되는 정격풍속 이하인 경우와 다른 점이다.

[0116] [수학식 9]

$$Ctv_{ts}(\theta,\beta)=\frac{F_{Ti,ts}(\theta,\lambda)}{F_{Ti}(\lambda)}$$

[0117]

[0118] [수학식 10]

$$F_{Ti,ts}(t)=Ctv_{ts}(\theta(t),\beta(t))\left[\frac{\pi\rho R^2}{6}C_T(\lambda(t),\beta(t))\,V_m^2(t)\right]$$

[0119]

[0120] 정의된 “타워 섀도우 추력변동 계수(Ctv_{ts})”는 타워 섀도우로 인한 추력의 변동이 타워 섀도우가 없는 경우의 추력보다 어느 정도의 비율로 증가 또는 감소하는지를 알려주는 것이라 볼 수 있다.

[0121] 수학식 9에서 F_{Ti}는 수학식 5를 사용하여 구할 수 있고, $F_{Ti,ts}$는 수학식 3으로 구한 값을 이용하면 된다. 예를 들어 평균 풍속이 16m/s일 때, 타워 섀도우가 없는 경우의 추력(F_{Ti})은 49.8kNm이고, 타워 섀도우가 있는 경우의 추력($F_{Ti,ts}$)은 도 8과 같이 로터의 회전 방위각(Θ)에 따라 변동한다. 수학식 9로부터 “타워 섀도우 추력변동 계수(Ctv_{ts})”를 구하면 도 9와 같이 구할 수 있다.

[0122] 도 10은 타워 섀도우가 있는 경우 정격풍속 이상(12~25m/s)에서 풍속에 따른 “타워 섀도우 추력변동 계수(Ctv_{ts})”의 최댓값과 최솟값을 보여주고 있다. 풍속이 증가함에 따라 최댓값은 조금 증가하지만, 최솟값은 크게 감소하는 경향임을 확인할 수 있다. 최솟값이 풍속이 증가함에 따라 크게 감소하는 것은 블레이드 피치각의 변화에 영향을 크게 받기 때문이다. 정격풍속 이상에서는 풍속이 커질수록 피치각이 증가한다(도 6참고).

[0123] 그러므로 정격풍속 이상에서 “타워 섀도우 추력변동 계수(Ctv_{ts})”의 진폭(최댓값과 최솟값)은 풍속의 함수가 아니라 피치각의 함수로 볼 수 있다. 이는 “타워 섀도우 추력변동 계수”의 진폭(최댓값과 최솟값)에 미치는 영향은 정격풍속 이상과 정격풍속 이하에서 서로 다름을 의미한다. 정격풍속 이하의 경우 “타워 섀도우 추력변

동 계수" 의 진폭(최댓값과 최솟값)은 주속비의 함수로 볼 수 있다. 도 11은 타워 섀도우가 있는 경우 정격풍속 이상(12~25m/s)에서 피치각에 따른 "타워 섀도우 추력변동 계수(Ctv_{ts})" 의 최댓값과 최솟값을 보여준다.

[0124] 정격 풍속이상에서는 제안된 수학식 9의 "타워 섀도우 추력변동 계수(Ctv_{ts})" 와 추력계수를 이용하는 수학식 10을 이용하여, 로터의 회전 방위각(Θ)과 블레이드의 피치각(β)에 따라 블레이드 하나에 타워 섀도우로 인해 발생하는 추력 변동을 구현할 수 있다.

[0125] 구해진 "타워 섀도우 추력변동 계수(Ctv_{ts})" 는 도 12와 같은데, 로터의 회전 방위각(Θ)과 블레이드의 피치각(β)의 함수로 표현된다. 세 블레이드는 120도 간격으로 설치되므로, 각 블레이드의 회전 방위각($\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$)은 수학식 11과 같다. 각 블레이드에 발생하는 추력 변동은 "타워 섀도우 추력변동 계수(Ctv_{ts})" 의 사용 시에 로터의 방위각에 0도와 120도와 240도를 각각 더하여 사용하면 된다.

[0126] [수학식 11]

[0127] $$\theta_1 = \theta,\ \ \theta_2 = \theta + 120^o,\ \ \theta_3 = \theta + 240^o$$

[0128] 그리고 타워 섀도우로 인해 세 블레이드에 발생하는 비대칭 추력 변동으로 인해 로터 허브에 발생하는 추력 변동($F_{T,ts}$)은 수학식 12와 같이 세 블레이드의 각 추력을 더하면 된다.

[0129] [수학식 12]

[0130] $$F_{T,ts}(t) = F_{T1,ts}(t) + F_{T2,ts}(t) + F_{T3,ts}(t)$$

[0131] 제안된 수학식 9의 "타워 섀도우 추력변동 계수(Ctv_{ts})" 와 추력계수를 이용하는 수학식 10을 이용하여 Matlab/Simulink를 이용하여 타워 섀도우의 동하중 모델을 구현하였다(도 13).

[0132] 로터의 회전 방위각(Θ)과 블레이드의 피치각(β)이 입력되면 각 블레이드의 "타워 섀도우 추력변동 계수(Ctv_{ts})" 가 계산된다. 각 블레이드의 "타워 섀도우 추력변동 계수(Ctv_{ts})" 에 타워 섀도우가 없을 때의 추력값(F_{Ti})이 곱해져서, 세 개의 블레이드와 로터 허브에서 발생하는 추력 변동이 계산된다. 구현된 Matlab /Simulink를 이용하여 풍속에 따른 추력변동을 확인하였다.

[0133] 도 14와 도 15는 풍속 16m/s인 경우 타워 섀도우의 영향으로 인해 세 블레이드에서 발생하는 추력 변동($F_{T1,ts}$, $F_{T2,ts}$, $F_{T3,ts}$)과 로터 허브에 발생하는 추력 변동($F_{T,ts}$)에 대한 수치실험 결과를 각각 보여주고 있다. 추력계수를 이용하지 않고 공력계수를 직접 이용하는 BEM 방법의 결과와 거의 일치하는 응답을 확인할 수 있었다.

[0134] 본 발명의 실시예에서는 추력계수를 이용하여 타워 섀도우에 의한 추력변동 동하중을 표현하는 방법을 제안하였다. 이를 위하여 "타워 섀도우 추력변동 계수" 를 도입하였고, 이를 타워 섀도우에 의해 변동하는 추력값을 타워 섀도우가 없을 때의 추력값으로 나눈 비로 정의하였다. 피치각이 변동하는 정격풍속 이상에서 "타워 섀도우 추력변동 계수" 를 로터의 회전 방위각과 블레이드 피치각의 함수로 단순화하여 표현할 수 있음을 확인하였다.

[0135] 그리고 2MW 육상용 풍력터빈을 대상으로 정격풍속 이상에서 "타워 섀도우 추력변동 계수" 를 구하여 확인하였다. 구해진 "타워 섀도우 추력변동 계수" 와 추력계수를 이용하여 Matlab/Simulink에서 타워 섀도우 동하중 모델을 구현하였고, 블레이드에 작용하는 추력변동을 추력계수와 "타워 섀도우 추력변동 계수" 를 동시에 이용하여 정격풍속 이상에서 표현할 수 있음을 보였다.

[0136] 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

[0137] 1:풍력터빈 시스템

2:로터

3:블레이드

4:발전기

5:기어박스

6:허브

7:타워

10:추력연산부

20:타워 섀도우 추력변동획득부

30:타워 섀도우 추력변동계수 연산부

40:블레이드 추력 모델링부

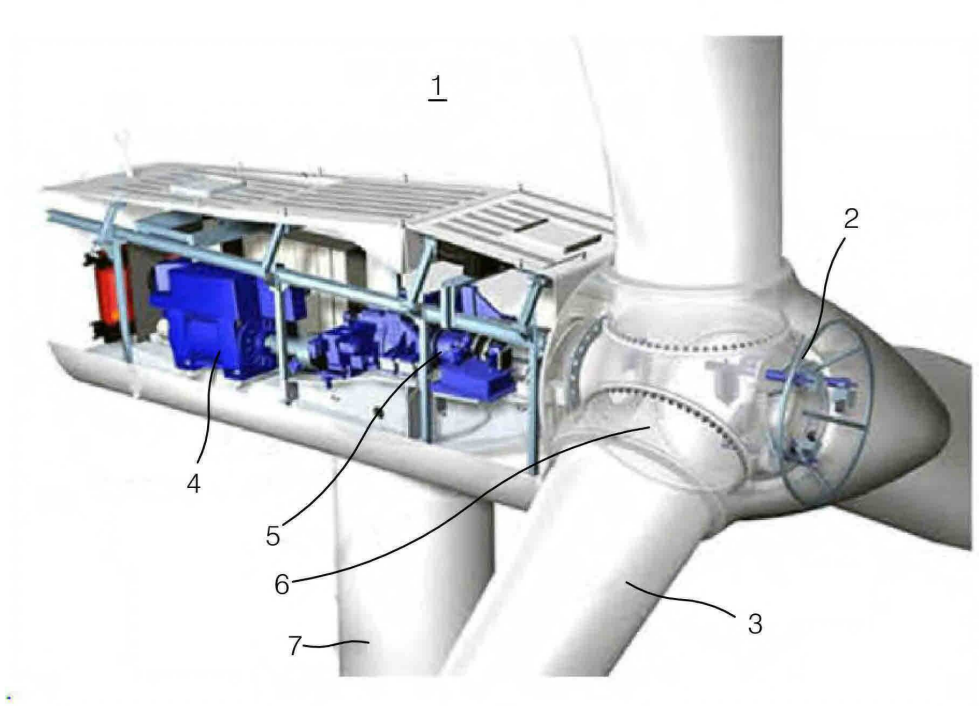
50:데이터베이스

60:로터추력 모델링부

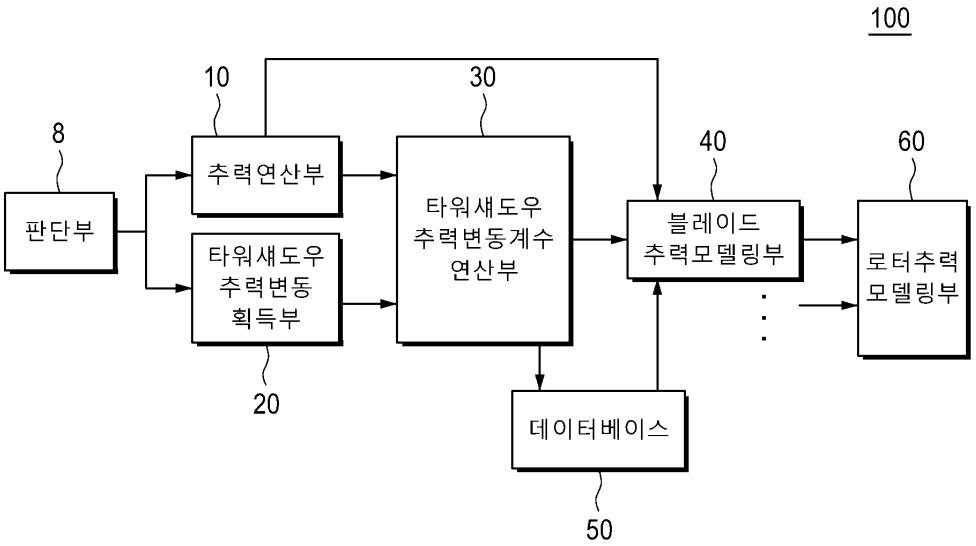
100:타워 섀도우에 의한 풍력터빈의 추력 동하중 모델링 시스템

도면

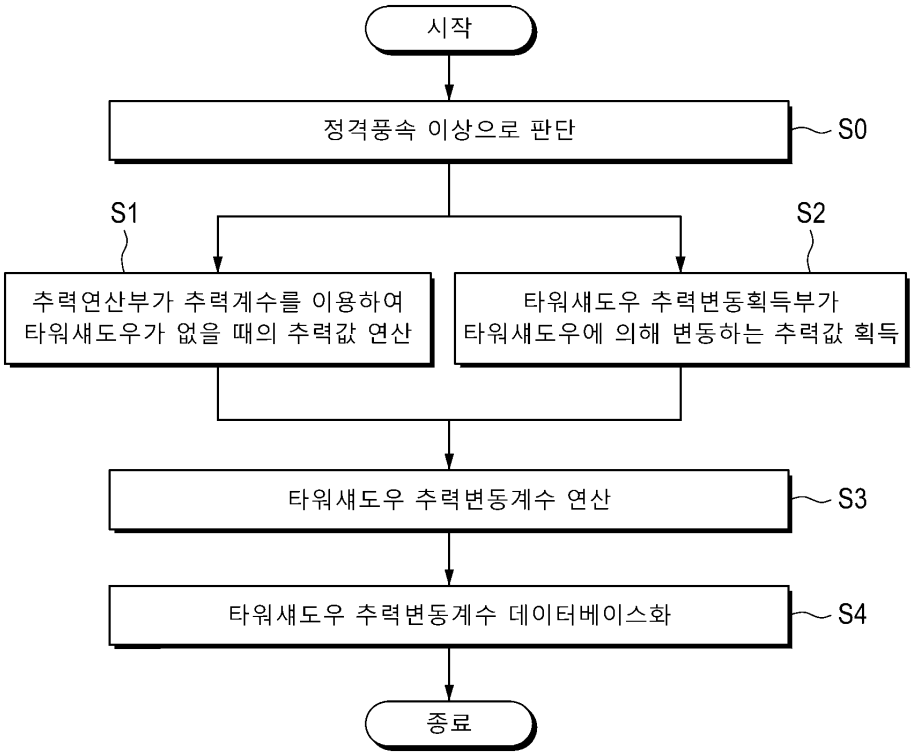
도면1



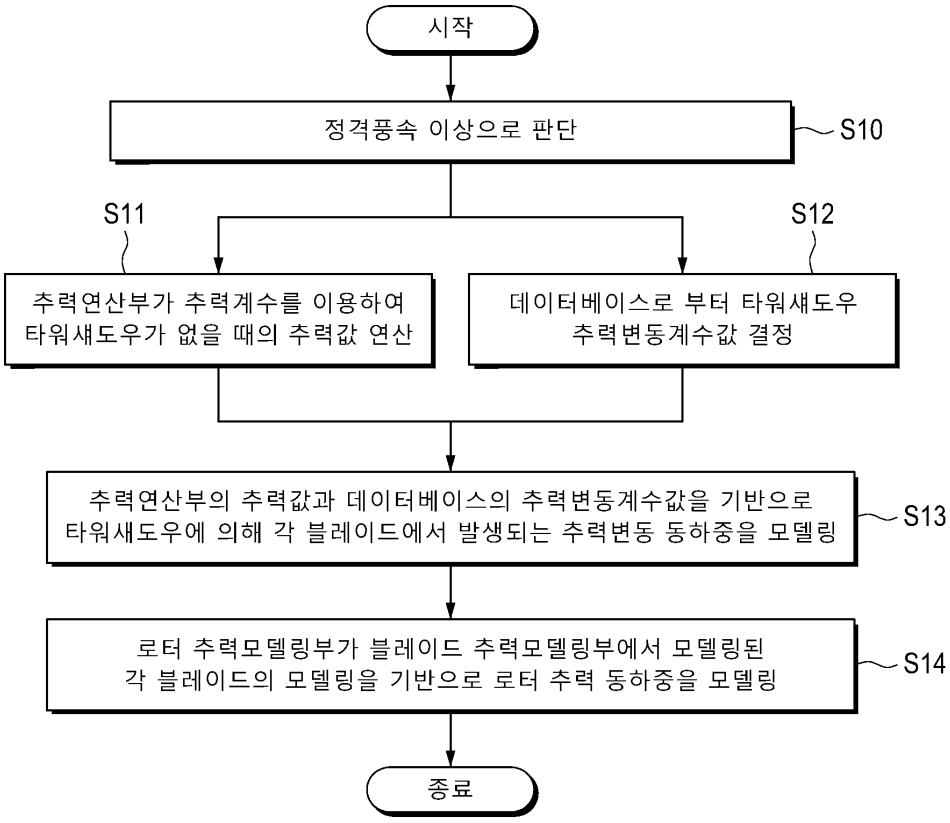
도면2


100
10
30
8
40
60
추력연산부
타워섀도우
추력변동계수
연산부
판단부
블레이드
추력모델링부
로터추력
모델링부
타워섀도우
추력변동
획득부
20
데이터베이스
50

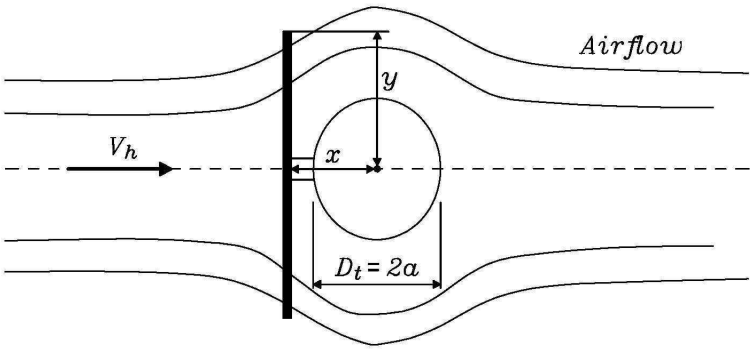
도면3a


시작
정격풍속 이상으로 판단
S0
S1
S2
추력연산부가 추력계수를 이용하여
타워섀도우가 없을 때의 추력값 연산
타워섀도우 추력변동획득부가
타워섀도우에 의해 변동하는 추력값 획득
타워섀도우 추력변동계수 연산
S3
타워섀도우 추력변동계수 데이터베이스화
S4
종료

도면3b



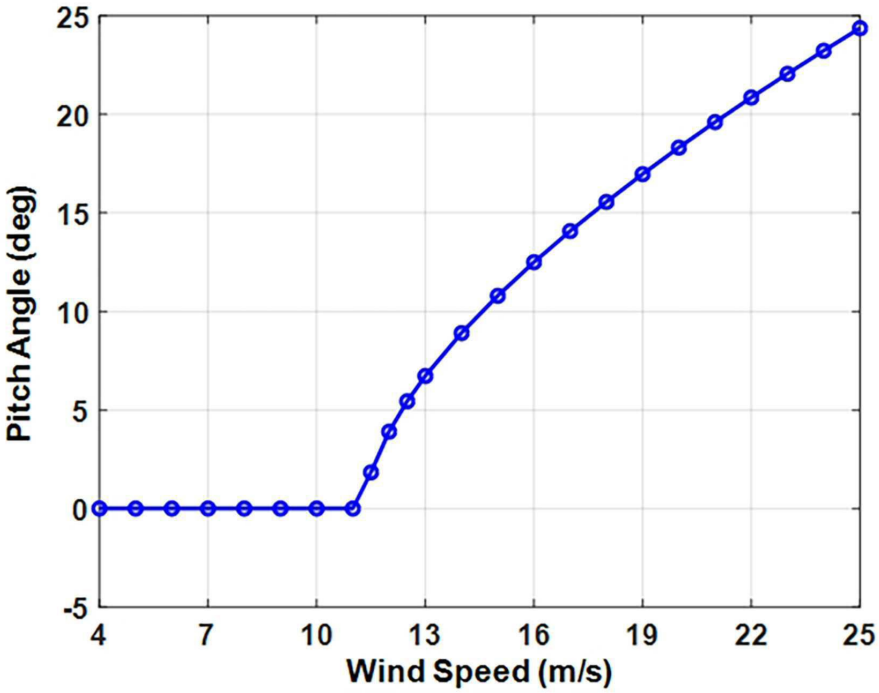
도면4



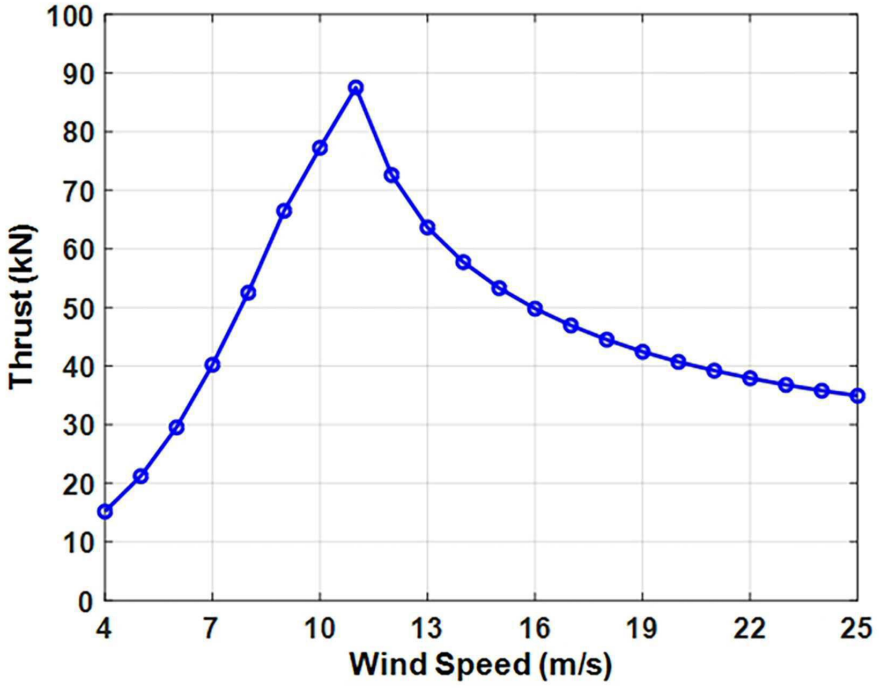
도면5

물리적 파라미터	값
블레이드 길이 (R)	40 [m]
블레이드 개수	3개
로터 관성 모멘트 (J_r)	6.209e6 [kgm^2]
발전기 관성 모멘트 (J_g)	60 [kgm^2]
기어박스 증속비 (N_{gb})	83.33

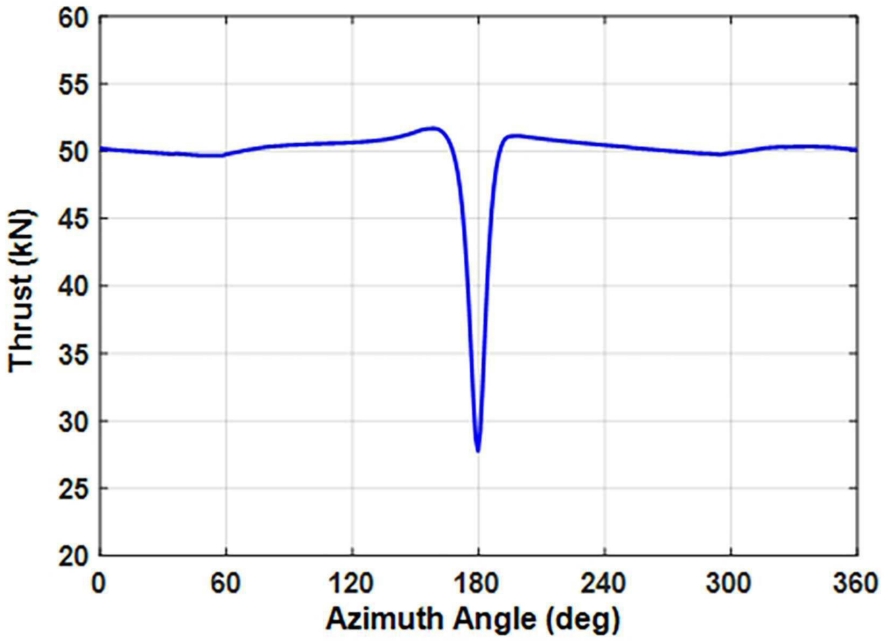
도면6


Pitch Angle (deg)
25
20
15
10
5
0
-5
4
7
10
13
16
19
22
25
Wind Speed (m/s)

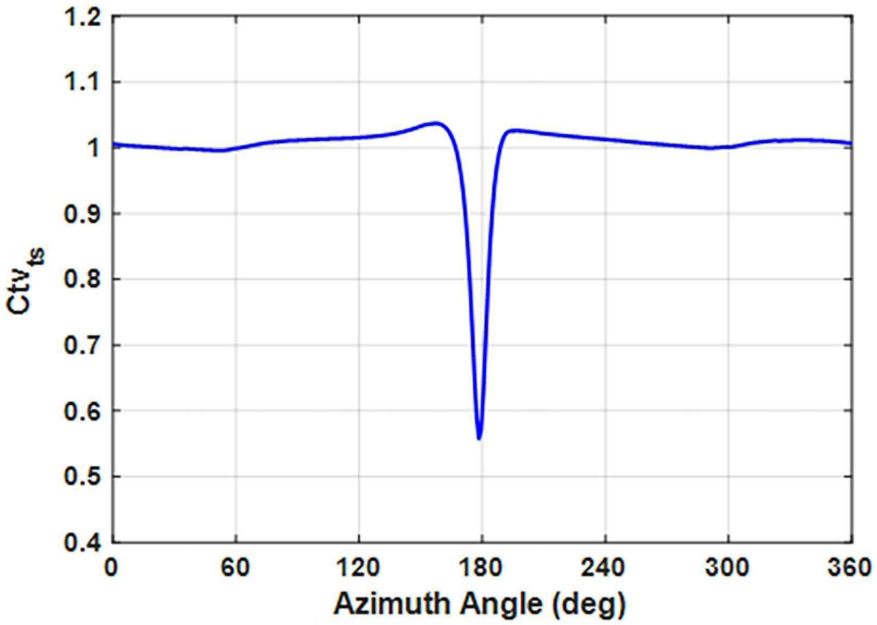
도면7


Thrust (kN)
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
4
7
10
13
16
19
22
25
Wind Speed (m/s)

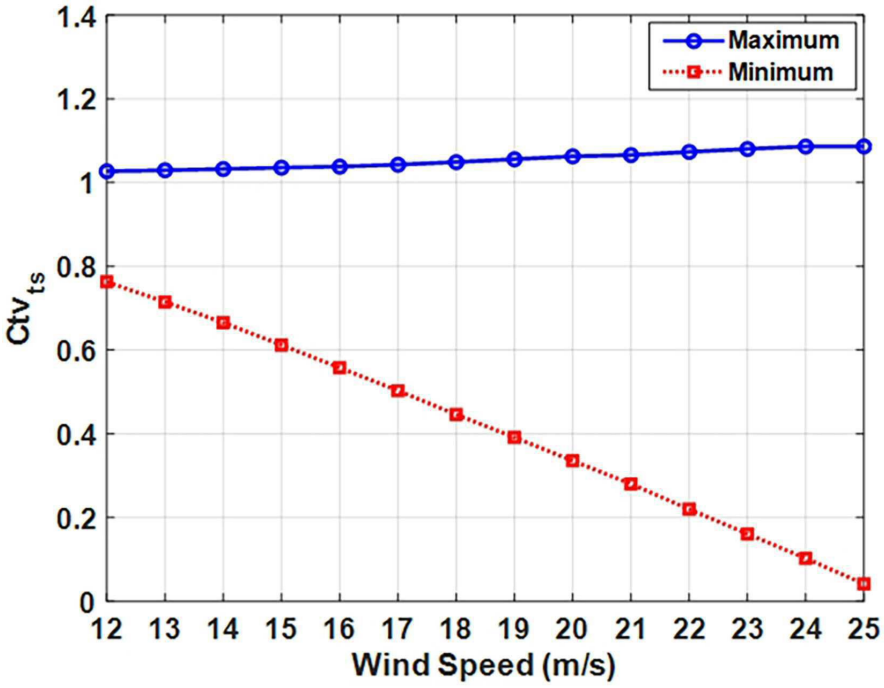
도면8


Thrust (kN)
60
55
50
45
40
35
30
25
20
0
60
120
180
240
300
360
Azimuth Angle (deg)

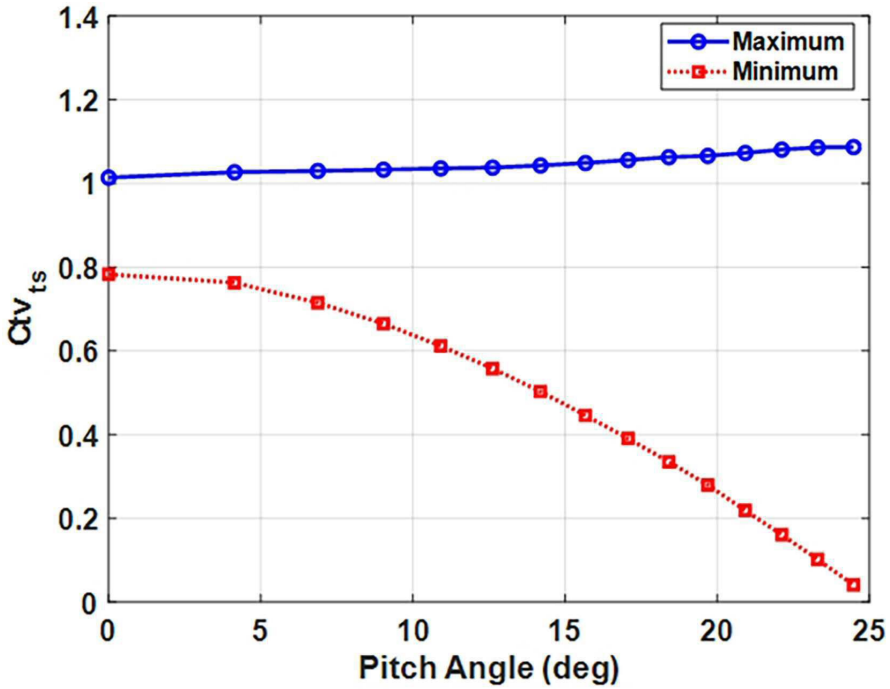
도면9


Ctv_ts
1.2
1.1
1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0
60
120
180
240
300
360
Azimuth Angle (deg)

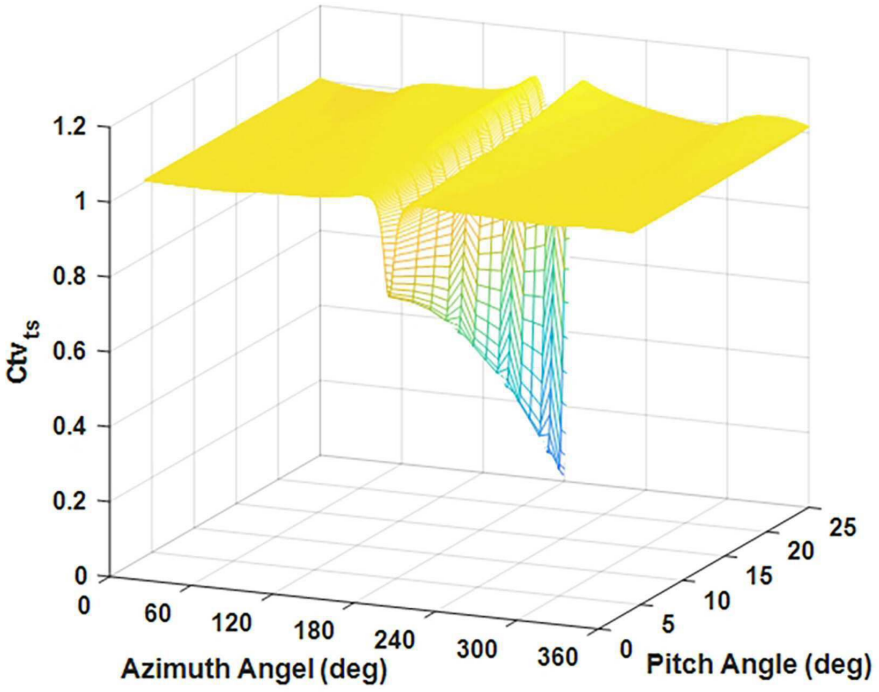
도면10


Maximum
Minimum
Ctv ts
Wind Speed (m/s)
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
1.4
12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25

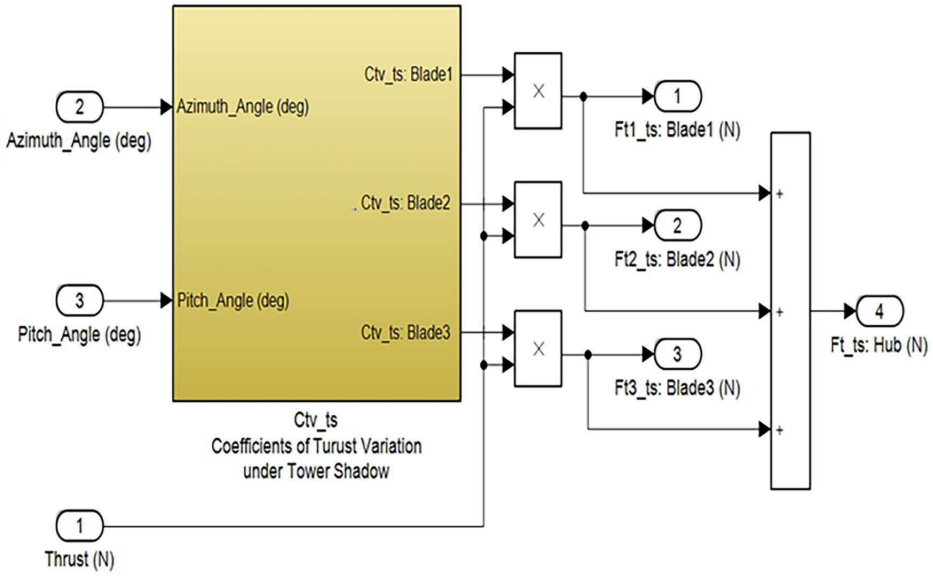
도면11


Maximum
Minimum
Ctv ts
Pitch Angle (deg)
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
1.4
0 5 10 15 20 25

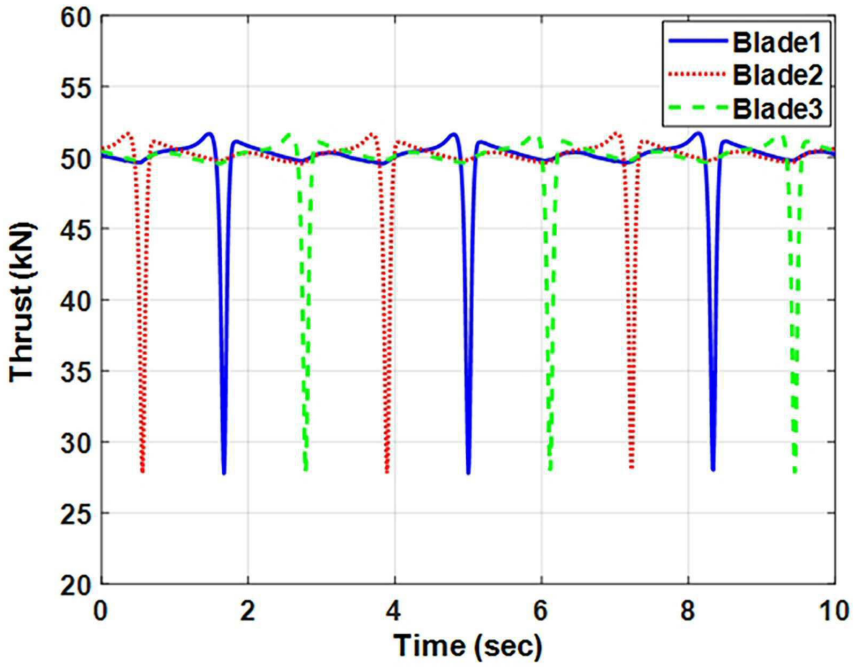
도면12


1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
Ctv_ts
0
60
120
180
240
300
360
Azimuth Angel (deg)
0
5
10
15
20
25
Pitch Angle (deg)

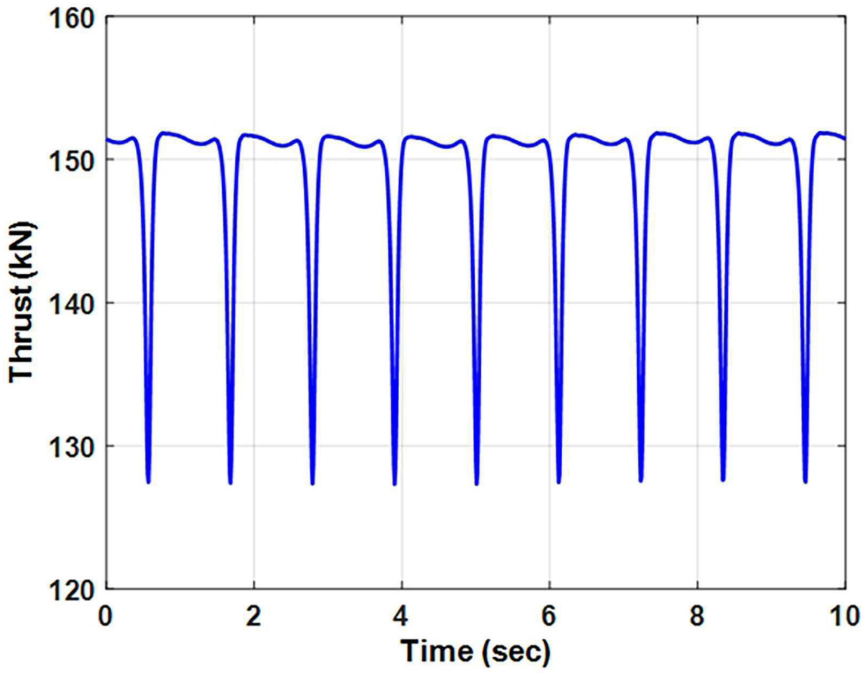
도면13


2
Azimuth_Angle (deg)
3
Pitch_Angle (deg)
1
Thrust (N)
Azimuth_Angle (deg)
Pitch_Angle (deg)
Ctv_ts: Blade1
Ctv_ts: Blade2
Ctv_ts: Blade3
Ctv_ts
Coefficients of Turust Variation
under Tower Shadow
X
X
X
1
Ft1_ts: Blade1 (N)
2
Ft2_ts: Blade2 (N)
3
Ft3_ts: Blade3 (N)
+
+
+
4
Ft_ts: Hub (N)

도면14


Blade1
Blade2
Blade3
Thrust (kN)
Time (sec)
60
55
50
45
40
35
30
25
20
0
2
4
6
8
10

도면15


Thrust (kN)
Time (sec)
160
150
140
130
120
0
2
4
6
8
10