

풍력발전시스템 개별피치제어설계 및 피로해석에 관한 연구

전경언* · 노태수*† · 김국선**

* 전북대학교 항공우주공학과

Design of Individual Pitch Control and Fatigue Analysis of Wind Turbine

Gyeong Eon Jeon*, Tae Soo No*† and Guk Sun Kim**

* Dept. of Aerospace Engineering, Chonbuk Nat'l Univ.

(Received April 16, 2013 ; Revised November 11, 2013 ; Accepted November 14, 2013)

Key Words: Individual Pitch Control(개별피치제어), Decentralized LQR(분산된 선형제곱조정기), Disturbance Accommodating Control(외란적응제어), Rainflow Counting(빗방울 횡수 계산), Fatigue Load(피로하중), Damage Equivalent Load(피해등가하중)

초록: 로터에 작용하는 불균형한 반복 하중은 풍력발전기에 구조적 하중을 발생시키고 이러한 하중이 구조물에 지속적으로 누적되면 피로 파괴와 수명 단축을 발생시킨다. Individual pitch control(IPC)은 이러한 구조적 하중을 저감시키고 풍력발전기의 작동 수명 연장에 효과가 있는 제어 방법이다. 본 연구에서는 Decentralized LQR(DLQR)과 Disturbance accommodating control(DAC)를 이용한 IPC 설계를 제시한다. DLQR은 로터 회전속도 제어를 위해 사용하였고 DAC는 블레이드에 외란으로 작용하는 바람(난류) 효과를 상쇄하도록 구성하였다. 제시된 IPC제어기의 구조적 하중 저감 효과는 Gain-scheduled PI로 설계된 Collective pitch control(CPC)과 비교하여 확인하였다. 또한, IPC의 구조물 하중 저감 효과를 확인하기 위해 피로 누적에 의한 손상정도를 나타내는 피로등가하중(DEL)을 이용하였다.

Abstract: Structural loading on a wind turbine is due to cyclic loads acting on the blades under turbulence and periodic wind field. The structural loading generates fatigue damage and fatigue failure of the wind turbine. The individual pitch control(IPC) is an efficient control method for reducing structural loading. In this paper, we present an IPC design method using Decentralized LQR(DLQR) and Disturbance accommodating control(DAC). DLQR is used for regulating rotor speed and DAC is used for canceling out disturbances. The performance of the proposed IPC is compared with CPC, which was designed with a gain-scheduled PI controller. We confirm the effect of fatigue load reduction with the use of damage equivalent load(DEL).

1. 서론

최근 풍력발전시스템은 MW급의 대용량해상풍력발전으로 개발이 이루어지고 있으며 발전 출력용량이 지속적으로 증가하는 추세를 보이고 있다. 이와 함께 풍력발전시스템도 대형화되었으며 이는 타워의 높이와 블레이드 날개 길이 증가로 나타난다. 일반적으로 로터의 작용하는 공기역학적 하중은 고도에 따른 수직 전단력과 난류 및 타워 그림자 효과 등에 의해 불규칙적으로 발생한다. 이러한 현상은 타워와 블레이드의 길이가 증가함에 따라 작용하는 하중의 정도가 더욱 커

지게 된다. 로터에 작용하는 하중은 타워나 허브, 로터 회전축 등과 같은 풍력발전시스템 구조물로 전달되며 이러한 하중이 지속적으로 작용하여 누적되면 구조물의 피로 파괴와 시스템 수명 단축을 발생시킨다.^(2,7-10) 최근 풍력발전시스템의 대형화로 인해 구조물의 경량화가 요구되고 있으며 이는 구조물 강성이 낮아지는 결과를 초래하였다. 따라서 구조물에 작용하는 하중 저감에 대한 중요성이 증가하게 되었고 이러한 하중을 저감시키기 위한 제어가 반드시 필요하다.

블레이드 피치제어는 정격 풍속이상(고풍속)에서 로터의 회전속도를 일정하게 제어하는 것을 목적으로 설계되고 제어 방법으로는 Collective pitch control(CPC)와 Individual pitch control(IPC)로

† Corresponding Author, rotthee@jbnu.ac.kr

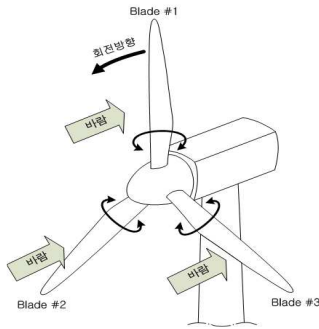


Fig. 1 Blade pitch control for IPC

구분할 수 있다. CPC는 허브(Hub)높이의 바람 속도를 고려하여 블레이드 피치각을 결정하는데 동일한 피치각을 적용하기 때문에 제어기 구조 및 설계가 간단하다.

IPC는 블레이드가 회전하면서 고도 및 위치에 따라 달라지는 바람의 세기를 고려하여 피치각을 결정한다. Fig. 1과 같이 각 블레이드는 120° , 240° 의 위상차를 가지므로 회전하기 때문에 각 블레이드에 작용하는 바람의 세기도 차이가 발생한다. 따라서 각 블레이드에 요구되는 피치각을 독립적으로 설계함으로써 로터 면에 불규칙적으로 작용하는 공기역학적 하중을 저감하는 효과를 기대할 수 있으며 풍력발전기 구조물에 작용하는 하중을 저감할 수 있는 특징이 있다. 이는 풍력발전기 구조물의 수명연장에 있어서 효과적이다. IPC의 하중 저감 효과는 기존의 많은 연구를 통해 입증되었다.^(2,7-10)

참고문헌 (1)에서는 시스템 상태 변수를 모두 사용하는 Least quadratic regulator(LQR)을 이용하여 IPC 설계를 수행하였으며 여기서 시스템 상태 변수는 로터의 회전속도와 각 블레이드의 플랩각의 정보를 이용하였다. IPC 설계를 위해서는 각 블레이드에 작용하는 바람의 세기의 정보가 필요하다. 참고문헌에서는 Disturbance accommodating control(DAC)을 이용하여 각 블레이드에 작용하는 바람의 세기를 예측하였다.⁽¹⁻⁴⁾ 여기서 DAC는 Fig. 1에서와 같이 기준 블레이드(#1)가 회전하면서 받는 바람의 세기를 난류가 포함된 허브 높이의 바람속도와 고도에 따라 세기가 달라지는 풍력 전단(Wind shear)으로 모델링하며 블레이드 #2, #3에 작용하는 바람은 120° , 240° 의 위상차를 고려하여 설계하는 방법이다. 참고문헌 (1)에서는 소형 풍력발전기 모델을 이용하였고 허브 높이에 서의 바람의 세기도 단순한 계단 입력 특성을 가

지는 바람을 이용하여 시뮬레이션 하였다.

소형 풍력발전시스템의 경우 제어기 설계를 위해 요구되는 시스템 정보로서 로터와 블레이드의 정보만을 이용하여 IPC를 설계할 수 있다. 하지만 제어 입력을 결정하는데 일부의 정보만을 사용하기 때문에 풍력발전기 전체의 구조적 하중 저감 효과를 확인하기 어렵다. 또한 대형 풍력발전기의 경우 구조물의 크기와 무게가 증가되기 때문에 시스템 정보를 로터와 블레이드의 정보 외에 타워의 정보도 함께 이용한 제어 입력 설계가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 기존 연구와 달리 대형 풍력발전시스템(NREL, 5MW)을 이용하여 IPC를 설계하였고 제어기 설계를 위한 상태 변수는 로터, 블레이드 그리고 타워의 정보를 함께 고려하여 설계하였다. IPC는 특정 제어 입력을 결정하는데 필요한 상태 정보만을 선택하여 제어 입력을 결정하는 Decentralized LQR(DLQR)을 이용하여 설계하였고 블레이드에 작용하는 바람은 DAC를 이용하여 예측하였다.⁽⁷⁻¹⁰⁾

DLQR은 고전적인 LQR에 비해 제어 이득 행렬의 구조를 임의로 설계할 수 있다는 장점이 있다. 예를 들어 IPC의 경우에는 특정 블레이드의 피치각을 결정하는데 타 블레이드 정보를 요구되지 않는다. 이러한 특성을 이용하여 제어 이득 구조를 간략화 할 수 있다. 시스템의 상태 변수 정보는 풍력발전시스템의 선형화를 통해 모델링된 예측기를 이용하여 결정한다.

DLQR과 DAC로 설계된 IPC의 시뮬레이션 결과는 Gain-scheduled PI 제어기로 설계된 CPC와 비교하였으며 구조물의 하중저감 정도를 확인하기 위해 피로 누적 정도를 확인하는 Damage equivalent load(DEL)방법을 이용하여 비교하였다.^(1,3,5)

2. 풍력발전시스템 구성

풍력발전시스템의 제어기는 Fig. 2와 같이 토크 제어기, 피치제어기 그리고 바람의 방향에 따라 나셀(Nacelle)의 방향을 제어하는 요(Yaw) 제어기로 구성된다. 본 연구에서 토크제어기는 MPPT(Maximum power point tracking)제어 방법을 이용하여 정격풍속이상에서 발전 출력 용량을 일정하게 유지하였다. 요 제어기는 사용하지 않는다.

피치제어기는 로터 회전속도 제어와 더불어 구조물에 작용하는 하중 저감이 가능하도록 IPC를

Table 1 Wind turbine characteristic⁽⁷⁾

Wind turbine model	NREL
Rated power	5 MW
Rotor orientation, configuration	Upwind, 3 blades
Rotor, Hub diameter	126 m, 3 m
Tower height	87.6 m
Nominal rotor speed ($V_{mean} = 18\text{m/s}$)	12.1 rpm
Nacelle mass	240,000 kg
Rotor mass	110,000 kg
Gear ratio	1:97

Table 2 State variables for linearized WT

x_1	1 st tower fore-aft DOF
x_2	1 st tower side-to-side DOF
x_3	Variable speed generator DOF
x_4	1 st flapwise bending DOF of blade 1
x_5	1 st flapwise bending DOF of blade 2
x_6	1 st flapwise bending DOF of blade 3
$x_7 \sim x_{12}$	Derivative of $x_1 \sim x_6$

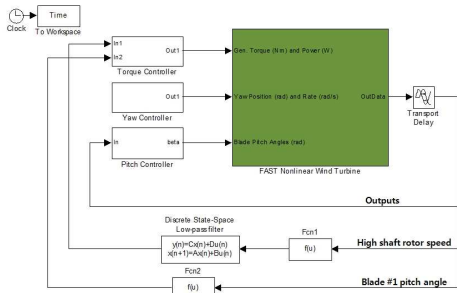


Fig. 2 Wind turbine model and controllers

설계하였다. 각 블레이드의 피치각은 시스템의 다양한 상태 변수 정보를 통해 결정할 수 있는데 본 연구에는 시스템 상태 변수를 Table 1에 제시한 풍력발전시스템 제원과 Table 2의 상태 변수 정보 이용하여 식 (1)과 같은 상태 방정식으로 모델링하였다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + B_D u_D(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $x(t)$ 는 시스템 상태 변수이고, $u(t)$ 는

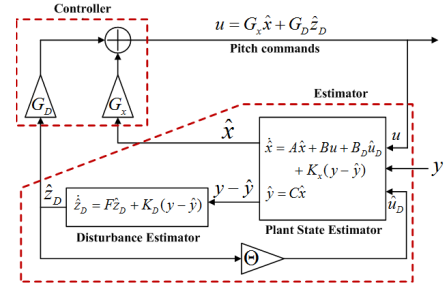


Fig. 3 Pitch controller

피치제어 입력 그리고 $u_D(t)$ 는 풍력발전시스템에 외란 입력으로 풍력발전기에 작용하는 바람을 말한다. $y(t)$ 는 시스템 출력이다.

IPC는 각 블레이드에 작용하는 바람 속도를 이용하여 피치각을 결정할 수 있는데 이때의 바람 속도를 직접적으로 측정하기 어렵다. 따라서 바람을 허브 높이의 바람 속도와 수진 전단을 이용하여 모델링할 수 있다. 블레이드의 위치는

$$z_g = r \cos(\Psi) \quad (2)$$

와 같고, r 은 로터의 반경, Ψ 는 로터의 회전각 (Azimuth angle)을 나타낸다. 식 (2)와 허브 높이에서의 바람속도 (V_{hub}), 타워의 높이(h) 그리고 바람전단계수(m)를 이용하여 다음과 같이 블레이드에 작용하는 바람을 모델링할 수 있다.^(1~4)

$$V(z_g) = V_{hub}(1 + z_g/h)^m \approx V_{hub}(1 + A_D \cos \Psi) \quad (3)$$

여기서 A_D 는 정현파의 진폭크기를 나타내며 풍력발전시스템 제원에 따라 결정된다.⁽⁴⁾ 식 (3)을 기준 블레이드(#1)에 작용하는 바람 모델이라고 할 때 나머지 블레이드는 각각 120°, 240°의 위상차를 가지므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.^(1~4)

$$V_1 = V_{hub}(\Psi) = V_{hub}(1 + A_D \cos \Psi) \quad (4)$$

$$V_2 = V_{hub}(\Psi) = V_{hub}(1 + A_D \cos(\Psi + 120)) \quad (5)$$

$$V_3 = V_{hub}(\Psi) = V_{hub}(1 + A_D \cos(\Psi + 240)) \quad (6)$$

식 (4)~(6)을 계단 입력과 정현파 조합을 이용하여 상태 방정식으로 모델링하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u_D(t) &= \Theta z_D(t) \\ \dot{z}_D(t) &= F z_D(t) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $z_D(t)$ 는 각 블레이드에 작용하는 외란

상태 정보, $u_D(t)$ 는 외란 입력으로 각 블레이드 바람속도를 나타낸다. 그리고 Θ , F 는 계단 입력과 정현파 변화의 조합으로 다음과 같다.

$$\Theta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\Omega^2 \end{bmatrix}, F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\Omega^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -\Omega^2 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 Ω 는 기준 상태(풍속:18m/s)의 로터 회전 속도(12.1rpm)를 나타낸다.

본 연구에서 피치제어기의 구조는 Fig. 3과 같이 시스템 상태 정보를 통해 로터 회전 속도 제어하기 위한 DLQR과, 로터가 회전하면서 각 블레이드에 외란으로 작용하는 바람의 상태 정보를 통해 외란 효과를 상쇄하기 위한 DAC로 구성된다. 제어 입력 설계를 위해 요구되는 시스템 및 외란 상태 정보는 시스템 상태 예측기와 외란 상태 예측기를 사용한다.

3. 예측기 설계

3.1 시스템 상태 예측기

IPC 설계를 위해 요구되는 시스템 상태 정보를 비선형 풍력발전기에서 직접적으로 계측하기 어렵다. 따라서 Fig. 3에서와 같이 시스템 상태 예측기를 이용하여 시스템 상태 정보를 이용한다. 시스템 상태 예측기는 시스템 선형화를 통해 결정된 모델(식 (2))을 이용하여 모델링할 수 있고 이렇게 설계된 시스템 상태 예측기는 시스템의 출력과 예측기의 출력간의 오차를 최소화함으로써 실제 시스템과 가장 유사하게 모델링할 수 있다. 식 (9)는 시스템 상태 예측기 모델이다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + B_D\hat{u}_D(t) + K_x(y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) &= C\hat{x}(t) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 $\hat{x}(t)$ 는 시스템의 상태 변수로서 Table 2에 제시한 것과 같고, $u(t)$ 는 제어를 통해 결정된 IPC 입력이며, $\hat{u}_D(t)$ 는 시스템에 작용하는 외란으로 각 블레이드에 작용하는 바람을 말한다. 시스템 예측기 이득(K_x)은 Table 3에 제시한 출력 정보를 이용하여 결정한다.

3.2 외란 상태 예측기

각 블레이드에 작용하는 바람을 직접적으로 계

Table 3 Output variables information

y_1	Flapwise tip deflection of blade 1
y_2	Flapwise tip deflection of blade 2
y_3	Flapwise tip deflection of blade 3

측하기 어렵다. 따라서 식 (7)과 같이 상태 방정식으로 설계된 바람 모델을 이용하여 외란 상태 예측기를 모델링하고 이를 통해 각 블레이드에 작용하는 바람을 예측한다.^(1~4) 식 (10)의 외란 상태 예측기는 출력 오차를 최소화함으로써 각 블레이드에서의 바람 속도와 외란 상태 정보를 확인할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{u}_D(t) &= \Theta \hat{z}_D(t) \\ \dot{\hat{z}}_D(t) &= F\hat{z}_D(t) + K_D(y(t) - \hat{y}(t)) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 K_D 는 외란 예측기 이득을 나타낸다. 식 (9)와 식 (10)의 시스템 및 외란 상태 예측기는 동일한 출력 오차 정보(Table 3)를 이용하기 때문에 예측기 이득(K_x, K_D)을 함께 결정할 수 있다.^(1~4) 예측기 이득은 식 (11)의 예측기 오차 방정식을 통해 결정할 수 있는데

$$\dot{e}(t) = (\tilde{A} - K\tilde{C})e(t) \quad (11)$$

여기서 예측기 오차는 다음과 같다.

$$e(t) = \begin{bmatrix} e_x(t) \\ e_D(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(t) - \hat{x}(t) \\ z_D(t) - \hat{z}_D(t) \end{bmatrix} \quad (12)$$

또한, \tilde{A} , \tilde{C} 은 식 (9)와 식 (10)을 통해 결정된다.

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} A & B_D\Theta \\ 0 & F \end{bmatrix}, \tilde{C} = [C \ 0], K = \begin{bmatrix} K_x \\ K_D \end{bmatrix} \quad (13)$$

다음의 성능 지수를 최소화하도록 MATLAB의 LQR함수를 이용하여 예측기 이득을 결정하였다.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (e^T \tilde{Q} e) dt \quad (14)$$

여기서 \tilde{Q} 는 가중치 행렬(Weighting matrix)이다.

4. 제어기 설계

IPC 설계를 위해선 시스템 상태 정보를 통해 제어 입력(피치각)을 결정하는 제어기뿐만 아니라 각 블레이드에 작용하는 외란(바람)의 정보를 고

려하여 외란 효과를 상쇄시키는 제어기 설계가 필요하다. 식 (15)는 시스템과 외란 상태 정보를 통해 제어 입력을 결정하는 제어기를 나타낸다.

$$u(t) = G_x \hat{x}(t) + G_D \hat{z}_D(t) \quad (15)$$

여기서 $\hat{x}(t)$, $\hat{z}_D(t)$ 는 예측기를 통해 결정된 시스템 및 외란의 상태 변수이고 G_x 와 G_D 는 제어 이득을 나타낸다. 여기서 G_x 는 DLQR을 이용하여 결정하였고 G_D 는 Moore-Penrose Pseudo-inverse를 이용하여 결정하였다.⁽¹⁻⁴⁾

4.1 로터 속도 제어기

식 (15)와 같이 설계된 제어기에서 시스템 상태 제어기는 예측기를 통해 결정된 상태 변수와 제어 이득으로 설계된다. 일반적으로 다수의 상태 변수 정보를 통해 제어 입력을 결정하는 방법으로 식 (16)의 고전적인 LQR 기법을 이용한다.⁽¹⁻⁵⁾

$$u(t) = -k_{LQR} x(t) \quad (16)$$

$$k_{LQR} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} & \dots \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} & \dots \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} & k_{36} & \dots \end{bmatrix} = G_x \quad (17)$$

이러한 고전적인 LQR은 제어 입력을 모든 상태 변수를 통해 제어 입력을 결정한다. 하지만 본 연구에서는 각 블레이드의 피치각이 독립적으로 적용되는 특성을 이용하여 식 (19)와 같은 DLQR을 이용하여 제어 이득을 결정하였다.⁽⁶⁾ DLQR은 각 블레이드 피치각을 결정하는데 설계하고자하는 블레이드의 정보와 공통적으로 요구되는 상태 변수 정보만 이용하여 제어 입력을 결정하는 방법을 말한다.

$$u(t) = -k_{DLQR} x(t) \quad (18)$$

$$k_{DLQR} = \begin{bmatrix} k'_{11} & k'_{12} & k'_{13} & k'_{14} & 0 & 0 & \dots \\ k'_{21} & k'_{22} & k'_{23} & 0 & k'_{25} & 0 & \dots \\ k'_{31} & k'_{32} & k'_{33} & 0 & 0 & k'_{36} & \dots \end{bmatrix} = G_x \quad (19)$$

식 (19)의 제어 이득을 통해 확인할 수 있듯이 제어 입력은 요구되는 상태 변수만을 이용한다. 이러한 제어 이득은 식 (20)과 같은 성능지수를 만족하도록 최적화를 통하여 결정된다.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^p g_{ij} k_{ij}^2 \quad (20)$$

여기서 Q 와 R 은 상태 변수와 제어 변수의 가중치(Weighting factor)이다. 또한, k_{ij} 는 고전적인 LQR 제어를 통해 결정된 제어 이득 값이고 g_{ij} 는 제어 이득의 가중치이다. 식 (19)에서와 같이 제어 입력을 결정하는데 요구되지 않는 제어 이득에 큰 가중치를 줌으로서 성능지수 최소화를 통해 거의 0에 가까운 제어 이득 값을 갖게 한다. 이렇게 0의 값을 갖는 제어이득은 각 블레이드 피치각을 결정하는데 이용되지 않음을 의미한다.

식 (20)의 성능 지수를 만족하는 제어 이득은 최적화를 통해 결정되고 이러한 최적화는 반복적인 계산 알고리즘이 요구된다. 본 연구에서는 MATLAB 최적화 Toolbox를 이용하였다.

4.2 외란 적응 제어기

예측기를 통해 로터 회전에 따라 각 블레이드에 외란으로 작용하는 난류를 포함한 바람을 예측하였으며 DAC를 이용하여 외란 효과를 상쇄시켜 제어 입력을 결정하였다.⁽¹⁻⁴⁾ DAC의 외란 이득은 다음과 같이 결정할 수 있다. 먼저, 식 (15)와 같이 설계된 제어기를 식 (1)의 상태 방정식에 대입하여 다음과 같은 식을 구한다.

$$\dot{x}(t) = (A + B G_x) x(t) + (B G_D + B_f \theta) z_D(t) \quad (21)$$

여기서 시스템 상태 제어 이득(G_x)는 앞서 소개한 DLQR을 통해 설계되고, 외란 이득(G_D)은 시스템에 작용하는 외란 효과를 상쇄 및 저감 시킬 수 있도록 다음과 같이 결정한다.⁽¹⁻⁴⁾

$$\| B G_D + B_f \theta \| \rightarrow 0 \quad (22)$$

위 식을 만족하도록 다음 수식과 같이 $B(B^+)$ 의 Moore-Penrose Pseudoinverse를 통해 외란 이득을 결정할 수 있다.⁽¹⁻⁴⁾

$$G_D = -B^+ B_f \theta = -(B^T (B B^T)^{-1}) B_f \theta \quad (23)$$

식 (23)에서 결정된 외란 이득은 외란 예측기를 통해 결정된 외란 상태 변수와 함께 IPC 입력을 결정하는데 이용된다. 즉, 시스템 상태 정보를 이용한 제어기가 로터 회전속도를 일정하게 유지하도록 설계되고, 외란 제어기는 각 블레이드에 독립적으로 작용하는 외란(바람)을 고려하여 외란 효과를 상쇄 및 저감 시켜 IPC 입력을 결정하는

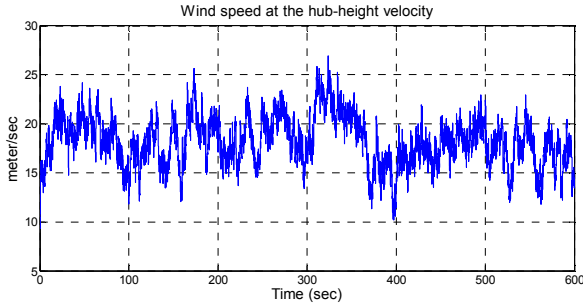


Fig. 4 Wind model at hub height

데 이용된다.

5. 시뮬레이션 결과

본 연구에서는 DLQR과 DAC를 이용하여 IPC를 설계하였으며 설계된 IPC의 구조적 하중 저감을 확인하기 위하여 Gain-scheduled PI제어기로 설계된 CPC와 비교하였다. IPC와 CPC의 제어 변수는 블레이드(#1,2,3)의 피치각으로 CPC의 경우 동일한 피치각으로 작동되므로 기준 블레이드(#1)의 피치각만 결정하면 된다.^(2,8,9) 블레이드 피치각을 결정하는데 요구되는 바람은 Fig. 4에 제시한 바람 속도로써 본 연구에서는 FAST 시뮬레이션을 통해 모델링한 바람 모델을 사용하였다. Fig. 4의 바람 모델은 평균 풍속 18m/s, 난류 강도 14.6%으로 모델링하였으며 시뮬레이션은 600초 동안 수행하였다. IPC와 CPC 모두 동일한 바람 조건에서 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 5는 Fig. 4에 제시한 바람에 따른 IPC와 CPC의 피치각 입력을 도시한 것이다. 여기서 CPC는 동일한 피치각이 입력되기 때문에 하나의 피치각으로 도시된 것과 같이 나타난다. IPC의 경우 로터 회전에 따른 각 블레이드의 위치에서 작용하는 바람에 따라 피치각이 결정되므로 서로 교차되는 주기적(cyclic) 형태를 나타낸다. 여기서 주기적 형태란 각 블레이드가 서로 120°, 240°의 위상차를 가지고 회전하기 때문에 나타나는 현상을 말한다. 이는 Fig. 6에서와 같이 IPC 피치각을 100~150초 동안의 확대한 결과로부터 확인할 수 있다. 이러한 블레이드 피치각의 주기적인 변화를 통해 로터에 작용하는 불규칙한 공기역학적 하중을 저감할 수 있고 풍력발전시스템 전체에 작용하는 구조적 하중을 저감할 수 있다.

Fig. 7은 로터 회전속도를 나타내며 CPC와 IPC 모두 평균적으로 정격 로터 회전속도(12.1 rpm)을

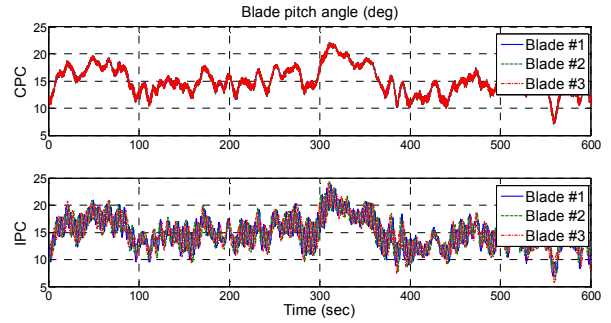


Fig. 5 Blade pitch angles (CPC vs. IPC)

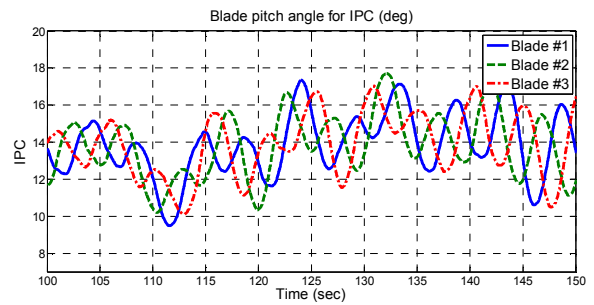


Fig. 6 The part of blade pitch angles for IPC

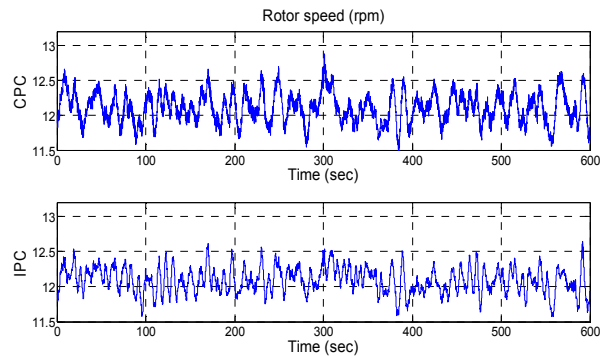


Fig. 7 Rotor speed (CPC vs. IPC)

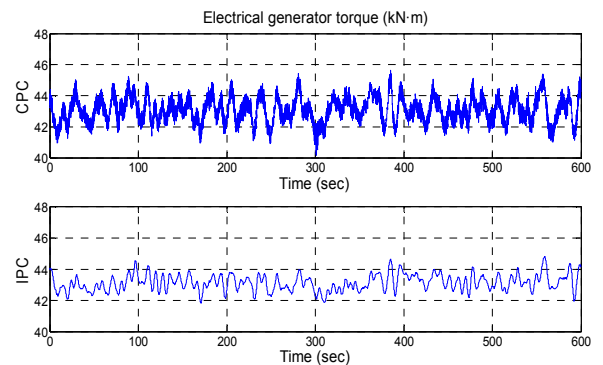


Fig. 8 Electrical generator torque

유지하는데 이는 Table 4에 제시된 평균값을 통해 확인할 수 있다. 하지만 표준편차의 차이를

Table 4 The comparison of CPC and IPC (Mean & Standard deviation)

	Collective pitch control		Individual pitch control	
	Mean	S/D	Mean	S/D
Rotor speed (rpm)	12.1101	0.367	12.0960	0.190
Generator torque (kN·m)	42.985	1.286	43.116	0.547
Generator power (kN·m)	4.989e3	129.575	5.000e3	0.340
Blade #1 flapwise moment (kN·m)	4.687e3	1.971e3	4.728e3	1.285e3
Blade #1 edgewise moment (kN·m)	146.394	2.523e3	135.131	2.452e3
Tower-base fore-aft moment (kN·m)	3.245e4	8.598e3	3.073e4	6.771e3
Tower-base side-to-side moment (kN·m)	6.155e3	2.991e3	4.827e3	2.920e3

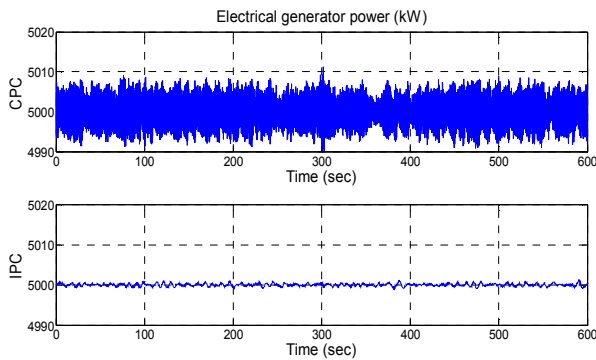


Fig. 9 Electrical generator power

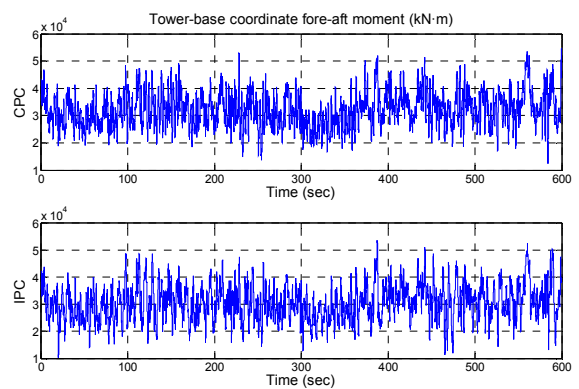


Fig. 11 Tower-base fore-aft moment

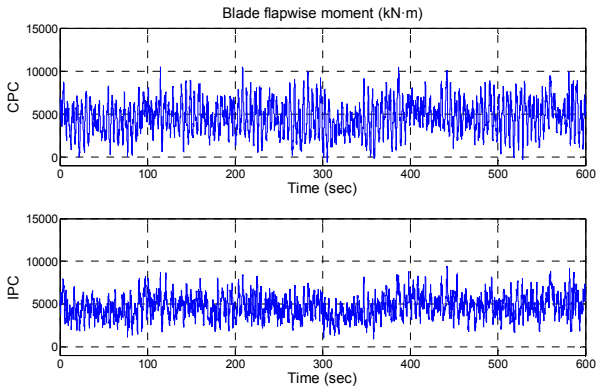


Fig. 10 Blade #1 flapwise bending moment

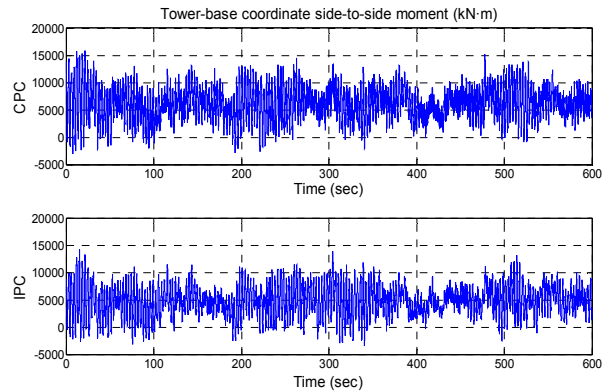


Fig. 12 Tower-base side-to-side moment

통해 IPC가 CPC에 비해 로터 회전 속도 제어가 우수한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9에서 CPC와 IPC의 발전기 출력이 큰 차이를 나타내는데 이것은 CPC가 발전기 출력 계수(Power coefficient, C_p)에 의해 민감한 피치각(Fig. 6)을 결정하기 때문에 발전기 출력 변화가 크게 발생한다.

공기역학적 하중은 블레이드와 타워에 주로 영향을 미치므로 블레이드 플랩(Flap)과 엣지(Edge) 방향으로의 변화 그리고 타워 기저(Basis) 기준의 앞, 뒤로의 변화를 통해 확인할 수 있다. Fig. 10

은 블레이드의 플랩 방향으로의 변화를 나타낸 것이다. Table 4의 수치적 결과 비교를 통해 IPC가 CPC에 비해 평균값은 약간 증가하지만 표준편차에서 약 34%정도 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 IPC를 이용하였을 때 블레이드에 작용하는 변화가 작음을 의미한다.

Fig. 11와 12은 타워 기저(Basis)에서의 앞, 뒤(Fore-aft) 변화와 좌, 우(Side-to-side) 변화를 비교한 결과이고 Table 4에 제시된 수치적 결과 비교를 통해 CPC에 비해 IPC가 타워 모멘트 변화에

미치는 효과를 저감시키는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 CPC에 비해 IPC를 이용한 제어가 풍력발전기 구조물에 작용하는 하중의 영향이 상대적으로 작음을 의미하고 이는 구조물에 작용하는 응력(Stress)이 더 작아 피로 하중 발생을 상대적으로 저감시킬 수 있음을 의미한다. 피로 하중의 저감은 곧 풍력발전시스템의 수명 연장에 기여하므로 본 연구에서 설계한 IPC의 제어 목적을 충분히 달성한 것으로 확인할 수 있다.

6. 피로 해석

일반적으로 풍력발전기의 설계 수명은 대략 20년으로 설정한다. 설계 수명까지 풍력발전기 구조물에는 지속적으로 반복적인 하중에 가해지게 되고 이러한 하중은 구조물에 피로 하중으로 작용하게 되어 구조물의 크랙과 파손 등의 피로 파괴를 발생시키고 이로 인해 풍력발전시스템의 수명을 단축시킨다. 이러한 피로 하중을 줄이는 것은 구조물의 교체 수명 증가와 고장 수리에 요구되는 비용을 줄이는 중요한 요인이 된다.

피로 파괴의 발생 정도를 확인하기 위해선 각 구조물에 작용하는 응력(Stress)으로 누적 하중의 정도를 확인하여야 한다. 본 연구에서는 IPC와 CPC의 피로 등가 하중 정도를 비교함으로써 풍력발전시스템 각 구조물에 작용하는 하중 저감 정도를 비교하였다.

풍력발전시스템 각 구조물에 발생하는 피로 파괴는 풍력발전기 설계 수명동안의 변동 하중(Fluctuating load)으로 확인할 수 있다. 이러한 변동 하중은 Fig. 11~14의 시간에 따른 모멘트의 최대, 최소값을 통해 결정되며 Rainflow counting(RFC)방법이 이용된다.⁽⁸⁻¹²⁾ RFC는 시스템에 작용하는 모멘트를 응력(Stress) 또는 변형(Strain) 신호로 변환하여 파형 크기나 반복횟수 계산을 수행하고 이를 통하여 하중이 발생하는 정도를 주기(Cycle)형태로 나타내는 방법이다. 이렇게 결정된 주기는 Miner's rule에 의해 손상(Damage) 정도를 수치적으로 나타낼 수 있는데 이를 피로등가하중(DEL)이라 한다. 이러한 방법은 시간에 따라 다양한 형태의 주파수에서 동일한 피해를 나타내는 평균, 진폭, 주파수를 갖는 하중 주기(Load cycle)을 비교한다. 즉, 전체 하중의 정도로 확인하는 것이 아닌 각 구조물에 작용하는 하중을 스펙트럼 형태로 나타내어 발생빈도가 가장 많은 하중

에 대해 확인하는 방법이다. 본 연구에서는 Mlife 프로그램을 이용하여 피로 등가 하중을 비교하였다.^(9,10) 설계 수명까지의 결과를 산출하여 2Hz 동안의 하중을 수치적 비교하였다. 식 (24~26)을 통해 단기 손상 정도와 총 등가 피로 주기를 계산하고 식 (26)을 통해 구조물에 파괴가 일어나기까지의 하중 주기의 횟수를 계산한다.

$$D^{ST} = \sum_k \frac{n_k}{N_k} = \frac{N^{STeq}}{N^{eq}} \quad (24)$$

$$n^{STeq} = f^{eq} \times T \quad (25)$$

$$N^{eq} = \left(\frac{L^{ult} - |L^{MF}|}{\left(\frac{1}{2} DEL^{STF} \right)} \right)^m \quad (26)$$

여기서 f^{eq} 는 피로 등가 하중의 주파수를 나타내며, T 는 경과 시간, n^{STeq} 는 총 등가 파괴 회수를 나타낸다. 여기서 m 은 각 구조물의 재료 시험으로부터 결정되는 S-N 곡선에 의해 결정되며 본 연구에서는 블레이드(Fiber glass) $m=10$, 타워(Steel) $m=4$ 그리고 로터 축은 $m=8$ 로 정의하였다. 또한, L^{ult} 는 각 재료의 극한 설계 하중(Ultimate design load)을 L^{MF} 는 고정 평균 하중(Fixed mean load)를 의미한다. 식 (26)에서 DEL^{STF} 는 다음과 같이 결정된다.

$$DEL^{STF} = \left(\frac{\sum_k (n_k (L_k^R)^m)}{n^{STeq}} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (27)$$

Table 5는 앞서 소개한 Short-term DEL방법을 통해 결정된 IPC와 CPC의 피로 등가 하중의 수치적 결과이다. 결과에서 확인할 수 있듯이 IPC가 CPC에 비해 풍력발전시스템의 각 구조물에 작용하는 피로 하중의 정도가 상대적으로 작음을 알 수 있다. 이러한 결과는 IPC가 풍력발전시스템의 설계 수명 동안 피로 손상의 발생 정도를 줄일 수 있는 제어 방법인 것을 의미하며 하중 저감을 위해서는 IPC 제어가 필요함을 의미한다.

Table 5 Short term DEL results (2Hz)

kN·m	CPC	IPC
Blade flapwise (m=10)	6.9223e3	6.4623e3
Blade edgewise (m=10)	9.6967e3	7.1712e3
Tower fore-aft (m=4)	2.2104e4	2.1852e4
Tower side-to-side (m=4)	8.4436e3	7.7488e3

7. 결 론

본 연구에서는 NREL의 5MW 풍력발전기의 제어원(Table 1)을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며 로터 회전 속도 제어를 위한 DLQR과 각 블레이드에 외란으로 작용하는 바람(난류)을 예측하여 외란 효과를 상쇄하는 DAC를 이용하여 IPC를 설계하였다. 또한, Gain-scheduled PI 제어기로 설계된 CPC와의 시뮬레이션 결과 비교를 통하여 IPC의 구조적 하중 저감 효과를 확인하였다. 이러한 하중 저감의 정도를 확인하기 위하여 Time-series의 시뮬레이션 결과와 DEL 해석 방법을 이용하였으며 IPC와 CPC의 하중 누적 정도를 수치적으로 비교하였고 IPC 하중 저감의 우수성을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012-0009149)

참고문헌

- (1) Hand, M. M., 2003 "Mitigation of Wind Turbine/Vortex Interaction Using Disturbance Accommodating Control," Ph.D. Dissertation, Department of Mechanical Engineering University of Colorado. Boulder, CO, USA, NREL/TP-500-35172.
- (2) Namik, H., 1994, "Individual Blade Pitch and Disturbance Accommodating Control of Floating Offshore Wind Turbines," Ph.D. The University of Auckland.
- (3) Wright, A. D., 2004, "Modern Control Design for Flexible Wind Turbines," *National Renewable energy Laboratory/TP-500-35816*.
- (4) Jeon, G. E., No, T. S., Kim, G. S. and Kim, J. Y., 2012, "Design of DAC and Decentralized LQR for Wind Turbine Individual Pitch Control" 2012 *KWEA Korea Wind Energy Spring Conference*, May, 16.
- (5) Pahn, T.-K., Nam, Y.S., Kim, H.G. and Son, J.H., 2012, "LQR Control for a Multi-MW Wind Turbine," *World Academy of Science, Engineering and Technology* 62.
- (6) Jonkman, J. M., 2007, "Dynamics Modeling and Loads Analysis of an Offshore Floating Wind Turbines," NREL/TP-500-41958.
- (7) Stava, O. M., 2012, "Fatigue Analysis of Offshore Wind Turbine," *Konstruksjoner og materialer*, Ph.D Thesis.
- (8) Bossanyi, E. A., 2005, "Further Load Reduction with Individual Pitch Control," *Wind Energy* 481~485.
- (9) Bossanyi, E. A., 2003, "Wind Turbine Control for Load Reduction," *Wind Energy*, Vol. 6, No. 3, pp. 229~244.
- (10) Olagnon, M. and Guédé, Z., 2008, "Rainflow Fatigue Analysis For Loads With Mutimodal Power Spectral Densities," *Archive Institutionele de l'Ifremer*, April-July 2008, Vol. 21, Issue 2-3, pp. 160~176.
- (11) International Electrotechnical Commission 2001, "IEC 61400-13, Measurement of Mechanical Loads," First edition.