

MW 규모 풍력 터빈의 기계적 하중 특성 해석 및 제어

Mechanical Loads Analysis and Control of a MW Wind Turbine

남윤수¹, 최한순¹✉
Yoonsu Nam¹ and Hansoon Choi¹✉

1 강원대학교 기계메카트로닉스공학과 (Department of Mechanical and Mechatronics Engineering, Kangwon Univ.)
✉ Corresponding author: hansoon21@kangwon.ac.kr, Tel: 033-250-6376

Manuscript received: 2010.4.5 / Accepted: 2010.6.28

A multi-MW wind turbine is a huge mechanical structure, of which the rotor diameter is more or less than 100 m. Rotor blades experience unsymmetric mechanical loads caused by the interaction of incoming wind with the tower and wind shear effect. These mechanical loads are transferred to the entire structure of the wind turbine and are known as the major reasons for shortening the life span of the wind turbine. Therefore, as the size of wind turbine gets bigger, the mitigation of mechanical loads becomes more important issue in wind turbine control system design. In this paper, a concept of an individual pitch control(IPC), which minimizes the mechanical loads of rotor blades, is introduced, and simulation results using IPC are discussed.

Key Words: Wind Turbine (풍력 터빈), Aeroelastic Model (공탄성 모델), Individual Pitch Control (개별피치제어), Power Curve Tracking Control (파워 커브 추종 제어), Out-of-plane Vibration (회전 평면 외 진동)

1. 서론

풍력 터빈은 바람 에너지를 전기 에너지로 변환하는 기계 시스템이다. 한번 설치되면, 최소한 20년 이상 정상 운전되어야 하는 풍력 터빈에서 두 가지 중요한 설계 관점은 바람 에너지 회수 효율과 구조물의 안전 작동이다. 이러한 설계 요구 조건은 가변속도-가변피치(variable speed- variable pitch, VSVP) 제어 기법을 적용하여 해결하는 것이 일반적 추세이다.¹⁻³ 그러나, 점차로 대형화되는 풍력 터빈에 대하여, 단순한 VSVP 제어 기법만으로는 구조물의 안전 작동을 기대할 수 없으며, 구조물의 진동을 완화시킬 수 있는 진동 제어 기법을 추가적으로 고려해야 한다.

MW 규모 풍력 터빈의 날개는 그 직경이 100미터 내외에 이르는 대형 기계적 구조물이다. 대형 구조물은 대부분 경량으로 제작되기 때문에 비

교적 낮은 댐핑 특성을 갖게 된다. 한편, 풍력 터빈의 회전 날개는 1회전하면서 날개 직경만큼의 고도 차이에 의한 윈드 시어(wind shear)를 겪게 되는 동시에 타워에 의한 바람 교란효과로 인하여, 1회전 성분(1p 성분)의 기계적 하중을 반복적으로 받게 된다. 각 회전 날개에 의하여 생성된 기계적 하중은 풍력 터빈 주축과 증속기, 발전기를 거쳐 풍력 터빈 타워에 전달된다. 이처럼 발생된 기계적 하중의 크기는 풍력 터빈의 발전 용량이 대형화될수록 더욱 커지게 되는데, 결국은 풍력 터빈의 수명 주기(life cycle) 단축에 결정적인 요소가 된다. 따라서, 회전 날개로부터 발생하는 기계적 하중의 크기를 최소화하는 제어 알고리즘의 개발이 점차로 중요해 지고 있다.⁴⁻⁸ 이러한 알고리즘을 개별 피치제어(individual pitch control, IPC)라고 부르며, 현재까지 다음과 같은 3가지 접근 방법이 연구되고 있다.

먼저, ECN(Energy research Center of the Netherlands) 연구 그룹의 IPC 알고리즘은 아래와 같이 요약될 수 있다.^{4,5} 각 회전날개의 플랩방향 기계적 하중을 측정하고, Coleman 좌표 역 변환을 통하여 이 값들을 풍력 터빈의 틸팅과 요(tilting and yaw) 방향 하중으로 바꾼다. 이 하중을 최소화 하는 제어기를 거친 후, 이를 다시 Coleman 변환을 통하여 각 회전 날개에 대한 IPC 명령신호로 변환한다. 이 값들은 통합 피치제어(collective pitch control) 명령신호와 합산되어, 각 피치 액츄에이터를 구동하는 명령신호가 된다. 제어기로서는 PI-제어기로부터 H_∞ 제어기까지 다양한 형태의 제어기를 사용하여 그 성능을 검증하고 있다. E.A. Bossanyi 가 제안한 IPC 제어는 전기 기계(electric machine)의 인버터 회로에 사용되는 d-q axis 제어 구조를 갖는데, 제어기로서는 단순한 PI-제어기, 또는 Kalman 필터를 적용하는 LQG 제어를 사용하였다.^{6,7} 마지막 방법은 RISO (National Laboratory for Sustainable Energy at the Technical University of Denmark) 연구진이 제안한 방법인데, 위의 두 방식과는 전혀 다른 구조의 IPC 제어이다.⁸ 회전 날개에 형성되는 기계적 하중은 바람과 날개의 공기역학적 관계에 의하여 결정되므로, 회전 날개 단면으로 불어오는 바람의 특성, 즉 받음각이나 바람의 상대 속도 등을 측정하여, 그 결과로 IPC 제어를 수행한다.

위에서 소개한 IPC 제어에 대한 연구를 수행하려면, 다음과 같은 2 개 분야에 대한 사전 연구가 선행되어야 한다. 먼저, 풍력 터빈이 작동되는 전체 운전 영역에 대하여, 회전 날개나 타워 구조물의 동역학적 특성이 어떻게 변화하는 지 파악하는 것이 중요하다. 위의 해석을 진행하려면, 풍력 터빈의 각 작동점에 대한 공탄성 모델(aeroelastic model)들이 필요하다. 여기서는 GH (Garrad Hassan)의 풍력 터빈 설계 전용 소프트웨어인 'Bladed'를 사용하여, 각 작동점에 대한 공탄성 모델들을 추출하였다.⁹ 선행 연구가 필요한 또 다른 분야는 파워 커브를 추종하기 위한 가변속도-가변피치(variable speed- variable pitch, VSVP) 제어 알고리즘에 대한 연구이다. VSVP 는 정격 풍속(rated wind speed)을 중심으로, max-C_p 제어와 통합 피치제어(collective pitch control)를 사용한 출력 파워 유지 제어로 분리된다.¹⁰

본 논문은 IPC 제어에 대한 연구 결과를 정리한 것이다. 먼저, 풍력 터빈의 전체 운전 영역에서

공탄성 모델의 동적 운동 특성 변화를 살펴 보았다. 후반부에서는, IPC 설계 절차를 제시하고, 이를 활용하여 수행한 IPC 시뮬레이션 선행 연구 결과를 분석한다.

2. MW 풍력 터빈의 동적 특성 해석

풍력 터빈의 동적 특성은 바람과 회전 날개의 공기역학적 현상으로 근원적으로 비선형이다. 따라서, 풍력 터빈의 운동 특성은 풍속에 따라 그 특성이 계속 변화되는데, 이에 대한 정량적 해석을 하려면 풍력 터빈의 비선형 운동을 각 작동점에 대하여 선형화시켜야 한다.

2.1 풍력 터빈의 정상상태 운동

풍력 터빈으로 일정한 속도의 바람이 불어오면, 풍력 터빈도 정상상태로 운전되고 있을 것이다. 즉, 회전 날개의 속도, 날개의 피치각, 생산 전력의 크기 등이 모두 일정한 값들로 유지된다. 주어진 풍속에 대하여 풍력 터빈의 정상상태 작동 조건들을 결정하려면, Fig. 1 과 같은 드라이브 트레인 모델(drive train model)이 사용될 수 있다. 이 모델에 대한 운동 방정식은 아래와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}
 J_r \frac{d\Omega_r}{dt} &= T_f - k_s(\theta_r - \frac{1}{N}\theta_g) - c_s(\Omega_r - \frac{1}{N}\Omega_g) - B_r\Omega_r \\
 J_g \frac{d\Omega_g}{dt} &= \frac{k_s}{N}(\theta_r - \frac{1}{N}\theta_g) + \frac{c_s}{N}(\Omega_r - \frac{1}{N}\Omega_g) - B_g\Omega_g - T_g
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

- 여기서, J_r, J_g = 저속, 고속 회전축의 관성 질량
 Ω_r = 회전 날개 속도
 Ω_g = 발전기 회전 속도
 k_s = 동력 전달축의 비틀림 계수
 c_s = 동력 전달축의 비틀림 댐핑 계수
 N = 기어 박스의 증속비
 B_r, B_g = 저속, 고속 회전축의 댐핑 계수
 T_f = 날개에 의하여 회수되는 공력토크
 T_g = 발전기 반력 토크

정상상태 조건에 대하여 식 (1)은 한 개의 대수 방정식으로 정리된다. 앞에서 간략하게 설명된 정격 풍속을 기준으로 분할 수행되는 max-C_p 제어와 파워유지 제어의 개념을 이 대수 방정식에 적용하면, 각 풍속에 대한 풍력 터빈의 정상상태 작동 조건은 Fig. 2 처럼 결정된다. 이 그림의 첫째

창은 정격 회전속도에 대하여 무차원화된 회전 날개의 속도, 두 번째 창은 $\max-C_p$ 상태에서의 피치각을 기준으로 계산한 무차원 피치각, 그리고 세 번째 창은 정격 토크로 무차원화 시킨 발전기 반력 토크를 각각 나타낸다.

2.2 풍력 터빈 구조물의 운동 모드

Fig. 1 구조의 모델로는 풍력 터빈 블레이드나 타워의 진동 특성 해석이 불가능하다. 이러한 해석을 수행하려면 공탄성 모델이 필요하다. 해석적인 수식들을 사용하여 이를 유도하는 방법도 있지만,⁴ 여기서는 Garrad Hassan 사의 풍력 터빈 전용 설계 소프트웨어인 Balded 를 활용하여 공탄성 모델을 유도하였다.⁹ 주어진 풍속에서 Fig. 2 와 같은 정상상태 운동 조건에 대하여 선형화를 수행하면, 아래 식과 같은 공탄성 선형모델을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, x = 공탄성 모델의 상태변수 벡터
 u = 발전기 반력 토크, 각 블레이드의 피치각과 교란 풍속

풍력 터빈에서 유연 구조물(flexible structure)로 모델링되는 부분은 3 개 블레이드로 구성된 회전 날개와 타워(tower)이다. 회전 날개의 진동 모드는 날개의 회전 평면을 기준으로, 평면 외(out-of-plane) 진동과 평면 내(in-plane) 진동으로 구분한다. 또한, 타워의 운동은 풍력 터빈으로 불어오는 바람을 기준으로 전후 방향, 그리고 좌우 방향 진동으로 분리하여 해석한다. Fig. 3 의 좌표계는 블레이드 위에 고정된 좌표계, 즉 날개의 회전속도로 회전하는 회전 좌표계이다. 각 날개에서 평면 내 그

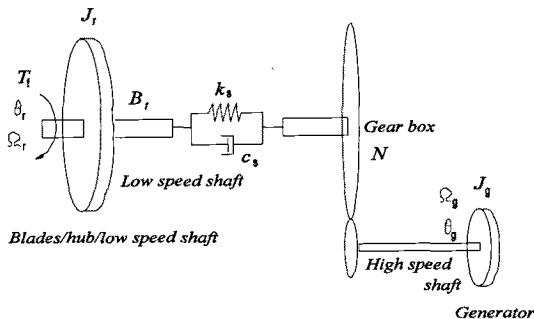


Fig. 1 Wind turbine drive train model

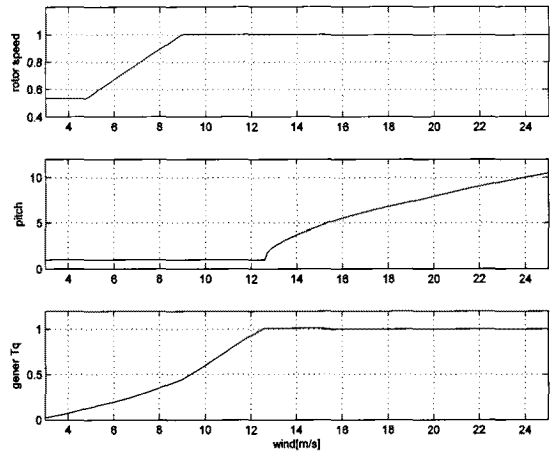


Fig. 2 Steady state operating points

리고 평면 외 방향으로의 굽힘 모멘트는 각각 M_x 와 M_y 이다.

Fig. 4 는 본 논문에서 고려하는 풍력 터빈에 대한 Cambell 선도이다.¹¹ 이 그림에서 수평 축은 날개의 회전 속도이고, 수직 축은 풍력 터빈 유연 구조물의 진동모드 주파수이다. 'x' 그리고 'o'와 함께 표시된 선들은 회전 날개의 평면 외 진동 모드와 평면 내 진동 모드 각각에 대한 주파수들이 날개의 회전 속도에 따라 어떻게 변화되는가를 나타낸다. 한편, '◇'와 함께 그려진 실선들은 타워의 전후 방향 그리고 '+'로 표시된 실선들은 타워의 좌우 방향 운동에 대한 모드 주파수들이다. 마지막으로, 이 그림에서 점선으로 표시된 6 개 선들은

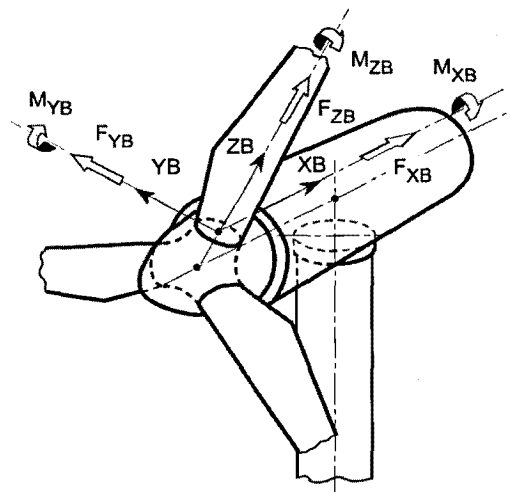


Fig. 3 Blade coordinate system

날개의 회전속도들을 나타내는데, 제일 하단의 선은 날개의 회전속도를 나타내는 1P 조건, 하단에서 두 번째 선은 회전 속도의 2 배인 2P 조건을 나타내며, 이후 순차적으로 증가하여 제일 상단의 선은 날개 회전 속도의 6 배인 6P 운동 조건을 각각 나타낸다. Fig. 4의 Campbell 선도에서 날개의 회전 속도를 나타내는 점선들은 풍력 터빈 구조물을 가진 시키는 가진 주파수(excitation frequency) 조건들로 이해될 수 있다. 따라서, 풍력 터빈의 진동 모드 주파수가 이 점선을 만난다면, 이 조건에서 공진 현상이 발생할 수 있다는 것을 의미한다. 본 논문에서 다루는 풍력 터빈의 날개 회전 속도 범위가 8~18 rpm(0.133~0.30 Hz) 이므로, 공진 현상이 나타날 수 있는 운동 모드는 0.3 Hz 근처에 있는 타워의 전후 또는 좌우 방향 1 차 진동 모드, 그리고 1 Hz 와 1.7 Hz 근처에 있는 회전 날개의 평면 외 방향 및 평면 내 방향 1 차 진동 모드들이다. 먼저, 0.3 Hz 에 있는 타워 공진은 날개의 회전속도가 9.2 rpm(0.153 Hz)일 때, 2P(0.3 Hz) 운전 조건, 그리고 18 rpm(0.3 Hz)일 때 1P(0.3 Hz) 운전

조건에서 발생할 수 있다. 한편, 1 Hz 근처에 존재하는 회전 날개의 평면 외 방향 1 차 진동 모드도 9.8 rpm(0.163 Hz)에서 6P, 12 rpm(0.2 Hz)에서 5P, 그리고 15.4 rpm(0.257 Hz)에서 4P 운전 조건에서 공진이 발생할 수 있음을 확인할 수 있다. 그러나, 다음과 같은 이유로 인하여, 위의 조건들에서 실제적으로 공진 현상은 발생하지는 않는다. 회전체인 날개 구조물의 경우, 발생하는 기계적 하중의 주된 주파수 성분들은 1 회전 성분의 정수 배인 1P, 2P, 3P, ... 주파수들이다. 한편, 지면에 고정된 타워 구조물의 경우, 날개 수의 정수 배인 3P, 6P, 9P, ...의 주파수들이 주된 성분들이다.⁴ 따라서, 위에서 명시한 조건들은 실제로 심각한 공진 현상을 발생시키지는 않는다.

2.3 풍력 터빈의 동적 특성 해석

Fig. 2의 작동점 변화에 대하여, 즉 풍속 변화에 대하여, 위에서 다루었던 유연 구조물인 회전 날개의 동적 특성이 어느 정도 변화 되는지 살펴 보자. Fig. 5는 풍속 변화에 따른 회전 날개의 평면

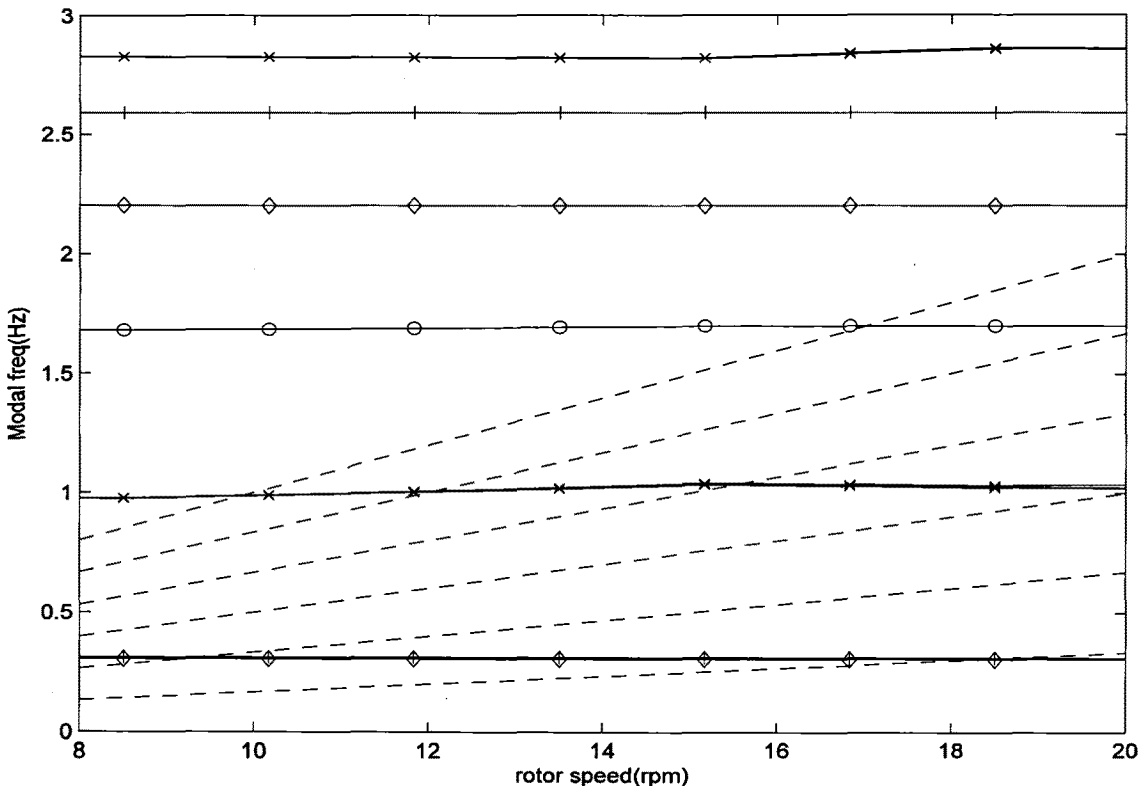


Fig. 4 Campbell diagram

의 진동 특성 변화를 나타낸다. 이 그림의 첫째 창에는 모드 주파수, 그리고 두 번째 창에는 모드 댐핑 변화가 그려져 있다. 'x'로 표시된 선은 평면의 진동의 1 차 모드, 또한 'o'로 표시된 선은 2 차 모드를 각각 나타낸다. 풍속이 커질수록, 각 모드의 주파수가 증가되는 것은 원심력(centrifugal force) 효과로 인하여 회전 날개의 강성이 증대되기 때문이다. 한편, 1 차 모드 댐핑은 대부분의 풍속 영역에서 0.4 이상이 되는데, 이것은 회전 날개의 구조적인 댐핑보다는 공기역학적 댐핑 효과로 인한 것이다.

Fig. 6 은 회전날개의 평면 내 진동 특성 변화를 정리한 것이다. 'x'로 나타낸 선은 1 차 진동 모드 중의 대칭/비대칭 운동 모드, '+'로 표시된 선은 2 차 진동 모드에서 집단(collective) 운동 모드, 그리고 'o'와 함께 그려진 선은 2 차 진동 모드중의 대칭/비대칭 운동 모드의 특성 변화에 각각 해당한다. 1 차 진동 모드에서 집단운동 모드는 날개 회전축의 회전을 뜻하는 강체 모드이므로, 모드 주파수와 댐핑이 모두 0 이 되어 Fig. 6 에서는 나타나지 않는다. 한편, 2 차 진동 모드에서 집단운동 모드의 주파수는 대칭/비대칭 운동 모드의 주파수보다 작는데, 그 이유는 회전축과의 연결에 있어, 날개의 기계적 구속 조건이 완화된 때문인 것으로 추정된다.

식 (2)로 주어진 공탄성 모델의 정확도를 평가하기 위하여 아래와 같은 시뮬레이션이 수행되었다. 풍력 터빈 허브(hub) 높이에서의 풍속이 20m/s 인 정상상태 운전 조건에서 두 번째 블레이드의 피치각에 0.5° 스텝(step) 교란을 가하고, 각 블레이

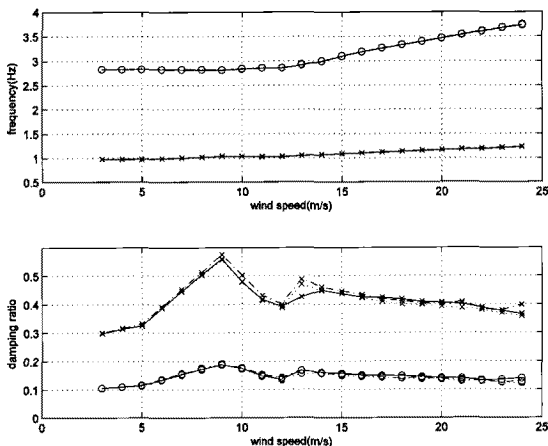


Fig. 5 Out-of-plane modal frequency and damping

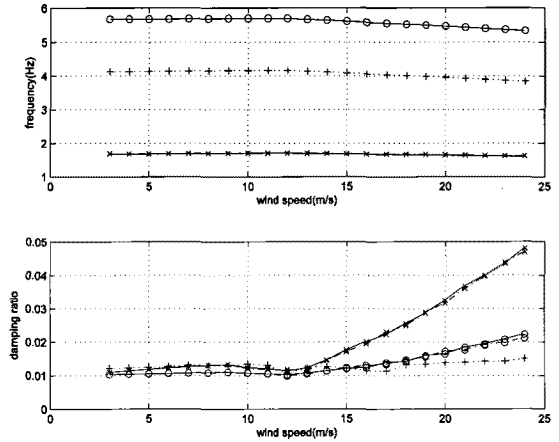


Fig. 6 In-plane modal frequency and damping

드에 나타나는 기계적 하중의 변화를 살펴 보았다. Fig. 7 은 이에 대한 시뮬레이션 결과를 정리한 것이다. 그림에서 보듯이, 시뮬레이션 시작 후 10 초부터 교란이 시작된다. 첫째 창은 회전 날개의 회전속도(rpm), 둘째 창은 첫 번째 블레이드의 루트(root) 부에 작용하는 평면 외 방향 굽힘 모멘트(kNm), 셋째 창은 두 번째 블레이드에서의 평면 외 방향 모멘트(kNm), 그리고 넷째 창에는 두 번째 블레이드에 작용하는 평면 내 방향 굽힘 모멘트(kNm)의 시간 응답이 각각 도시되어 있다. 이 그림에서 점선으로 표시된 응답은 식 (2)의 공탄성 선형 모델에 대한 시뮬레이션 결과이며, 실선은 GH Bladed 소프트웨어를 사용한 비선형 시뮬레이션의 결과이다. 시간응답의 평균을 비교할 때 두 시뮬레이션 결과는 거의 동일한데, 이로부터 식 (2)의 공탄성 선형 모델은 풍력 터빈의 운동 특성을 잘 표현한다고 결론할 수 있다. 한편, 두 시뮬레이션 결과의 차이는 시뮬레이션을 할 때, 3 차원 바람장(wind field) 효과의 유무에 의한 것이다. GH Bladed 에 의한 비선형 시뮬레이션 응답에서는 1P 인 15rpm 주파수 성분이 주도적으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 실제적인 피치각 교란이 주입되는 두 번째 블레이드의 루트부 평면 외 방향 굽힘 모멘트에서만, 이에 대한 작은 변화를 볼 수 있다. 평면 외 진동 방향 굽힘 모멘트의 1P 변화는 1 회전마다 회전 날개가 겪게 되는 윈드 시어(wind shear) 효과와 타워와 바람간의 간섭 효과로 발생된 것이며, 평면 내 진동 방향의 굽힘 모멘트의 변화는 1 회전마다 변화되는 날개의 중력 효과에 의한 것이다.

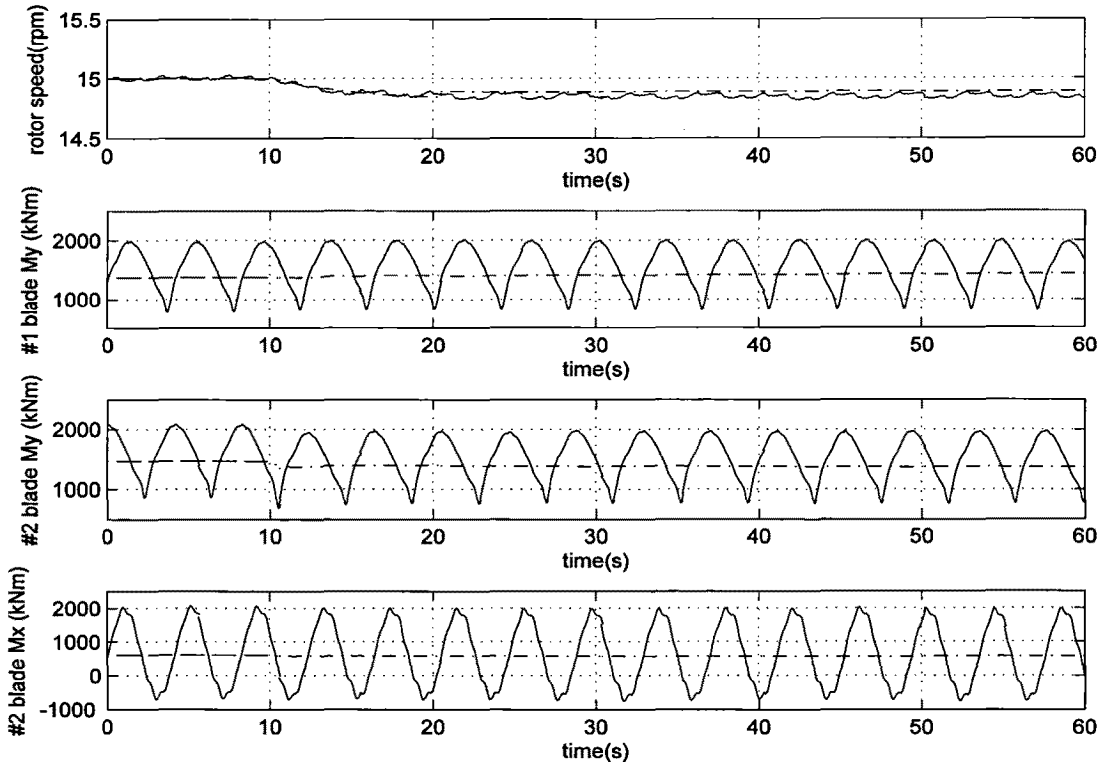


Fig. 7 Simulation results comparing nonlinear and aeroelastic model

3. 풍력터빈의 공탄성 제어

풍력 터빈 회전날개에는 1 회전마다 반복되는 1P 성분의 기계적 하중이 작용한다. 이 장에서는 블레이드의 피치각을 제어하여, 회전 날개의 1P 성분 하중의 크기를 저감시키는 IPC 제어기 설계에 대하여 논의한다.

3.1 IPC 제어 구조와 설계

Fig. 8 은 IPC 제어 시스템의 개략도이다. 이 그림의 아래 부분은 파워 커브 추종을 위한 제어 구조이며,¹⁰ 위 부분이 IPC 제어 구조이다. IPC 제어의 목적은 회전 평면 외(out-of-plane) 방향으로 작용하는 기계적 하중의 크기를 최소화하는 것이다. 각 블레이드의 루트(root) 부에 작용하는 평면 외 방향 굽힘 모멘트(M_{y1} , M_{y2} , M_{y3})에 대하여 아래의 Coleman 역변환, P^{-1} 을 수행하여 보자.⁴

$$\begin{pmatrix} M_{F1} \\ M_{F2} \\ M_{F3} \end{pmatrix} = P^{-1} \begin{pmatrix} M_{y1} \\ M_{y2} \\ M_{y3} \end{pmatrix} \quad (3)$$

여기서,

$$P^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 \sin \psi_1 & 2 \sin \psi_2 & 2 \sin \psi_3 \\ 2 \cos \psi_1 & 2 \cos \psi_2 & 2 \cos \psi_3 \end{bmatrix}$$

$\psi_i = i$ -번째블레이드의 회전 방위

식 (3)을 살펴보면, M_{F1} 은 각 블레이드에 작용하는 평면 외 방향 굽힘 모멘트들의 산술 평균이고, M_{F2} 와 M_{F3} 는 풍력 터빈의 나셀(nacelle)을 바람 방향으로 흔드는 틸팅 모멘트(tilting moment, M_{tilt})와 틸팅 방향과 수직으로 작용하는 요잉 모멘트(yawing moment, M_{yaw})에 비례하는 량들이라는 것을 바로 알 수 있다. IPC 제어를 통하여 그 크기를 최소화하려 하는 량은 M_{F2} 와 M_{F3} 이다. 이 값들을 0 으로 만들 수 있다면, 각 블레이드에는 진동 성분이 제거된 DC 성분의 굽힘 모멘트(M_{y1} , M_{y2} , M_{y3})만 존재하게 된다는 것을 식 (3)으로부터 유도할 수 있다. Fig. 8 처럼, M_{F2} 와 M_{F3} 의 크기를 0 으로 만드는 제어 량을 계산하고, 식 (3)의 P^{-1} 로부터 유추할 수 있는 Coleman 변환, P 을 이용하면, 각 블레이드에서의 IPC 피치 제어량을 산출할 수 있다.

3.2 IPC 시뮬레이션

Fig. 9 는 20m/s 풍속에 대하여 개별피치 제어 (IPC)에 대한 효과를 보여주는 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션 시작 10초 후에 풍속이 20m/s 에서 20.5m/s 으로 0.5m/s 의 스텝 풍속 변화에 대한 시뮬레이션이다. 이 그림에서 점이 포함된 선은 IPC 를 적용하지 않은 경우, 그리고 실선은 이를 적용한 경우에 시간응답을 각각 나타낸다. 첫째 창부터 날개 회전속도(rpm), 3 개 블레이드에 작용하는 회전 평면 외 방향 굽힘 모멘트(Nm), 그리고 식 (3)의 Coleman 역 변환으로 얻어지는 M_{F1} , M_{F2} , M_{F3} (Nm)에 해당한다. IPC 를 위해 사용한 제어기는 단순한 비례 제어기이다. Fig. 9 의 마지막 2 개 창에 그려진 응답은 킬팅 모멘트(M_{yfl})와 요잉 모멘트(M_{yaw})이다. 단순한 비례 제어기를 사용한 IPC 이지 만, 진동의 크기가 대략 40% 정도 감소되고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 9 의 결과는 IPC 의 효과를 검증하기 위하여 수행된 간략한 초기 시뮬레이션의 결과로서, Fig. 8 의 하단부에 도시된 파워 커브 추종 제어가 적용되지 않은 결과이다. 앞으로 보다 좋은 기계적 하중 감쇄를 위하여, 다양한 구조의 IPC 제어 알고리즘의 적용을 고려해야 하며, 파워 추종커브 제어기와 함께 IPC 제어의 성능을 평가해야 한다.

4. 결론

수 MW 풍력 터빈의 회전 날개에 작용하는 기계적 하중을 최소화하는 제어 기법인 개별 피치제어에 관하여 논의하였다. 개별 피치제어에 앞서, 풍력 터빈 구조물의 공탄성 모델을 유도하고, 회

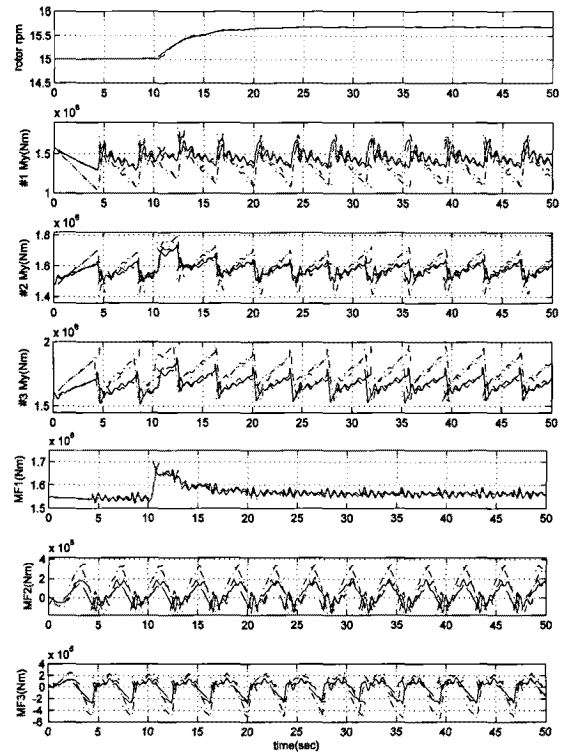


Fig. 9 Simulation results of IPC

전 날개의 진동 모드 특성 변화를 알아보았다. 공탄성 선형 모델의 정확도를 검증하기 위하여, 비선형 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 공탄성 선형 모델의 결과와 비교하였다. 단순한 비례제어기를 적용한 개별 피치제어에 의하여, 풍력 터빈 회전 날개의 평면 외 방향 기계적 하중의 크기가 40% 정도까지 감소되는 것을 시뮬레이션을 통하여 입증하였다. 이 결과는 선형 공탄성 모델을 사용한 결과이며, 추후 비선형 모델에 대하여 그 성능이 검증되어야 한다.

후 기

본 연구는 2010 년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 2008-N-BN-HM-E-08-0000)

참고문헌

1. Van der Hooft, E. L., Schaak, P. and van Egelen, T. G., "Wind Turbine Control Algorithms," ECN-C-03-

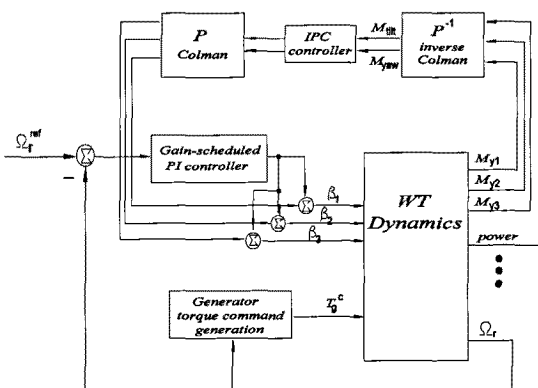


Fig. 8 Control law structure of IPC

- 111, pp. 9-55, 2003.
2. Bianchi, F. D. and Battista, H. D., "Wind Turbine Control Systems Principles, Modeling and Gain Scheduling," Springer, pp. 29-47, 2007.
 3. Leithead, W. E. and Connor, B., "Control of Variable Speed Wind Turbines: design task," Int. Journal of Control, Vol. 73, No. 13, pp. 1189-1212, 2000.
 4. van Egelen, T. G., Markou, H., Buhl, T. and Marrant, B., "Morphological Study of Aeroelastic Control Concept for Wind Turbines," European Union Project STABCON Task-7 Report, EU-Contract ENK5-CT-2002-00627, pp. 11-52, 2002.
 5. van Egelen, T. G., "Design Model and Load Reduction Assessment for Multi-rotational Mode Individual Pitch Control," European Wind Energy Conference, ECN-RX-06-068, 2006.
 6. Bossanyi, E. A., "Individual Blade Pitch Control for Load Reduction," Wind Energy, Vol. 6, No. 2, pp. 119-128, 2003.
 7. Bossanyi, E. A., "The Design of Closed Loop Controllers for Wind Turbines," Wind Energy, Vol. 3, No. 3, pp. 149-163, 2000.
 8. Larsen, T. J., Madsen, H. A. and Thomsen, K., "Active Load Reduction Using Individual Pitch, Based on Local Blade Flow Measurements," Wind Energy, Vol. 8, No. 1, pp. 67-80, 2005.
 9. Bossanyi, E. A., "GH Bladed theory manual," Garrad Hassan, pp. 13-35, 2003.
 10. Nam, Y. S., "Wind turbine control," GS-intervision, pp. 91-102, 2009.
 11. Hau, E., "Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics, 2nd Edition," Springer, pp. 400-417, 2005.