

# MW급 풍력 터빈의 하중감소를 위한 개별피치제어 Individual Pitch Control of MW class Wind Turbines for Load Reduction

\*#최한순<sup>1</sup>, 김정기<sup>1</sup>, 조장환<sup>1</sup>, 남윤수<sup>1</sup>

\*#H. S. Choi(hansoon21@kangwon.ac.kr)<sup>1</sup>, J. K. Kim<sup>1</sup>, J. H. Cho<sup>1</sup>, Y. S. Nam<sup>1</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 기계메카트로닉스공학과

Key words : Wind Turbine, Aeroelastic Model, Individual Pitch Control, Power Curve Tracking Control

## 1. 서론

오늘날 풍력 터빈의 용량이 MW 급으로 커지게 되면서 풍력 터빈의 크기도 증가하고 있으며 대형구조물의 특성상 경량으로 제작되기 때문에 유연성을 갖는 낮은 뎀핑 특성이 나타나게 된다. 또한 풍력 터빈은 회전을 하면서 바람으로부터 기계적인 에너지를 전기적 에너지로 변환 시키는 장치이기 때문에 복합적인 하중이 회전 날개로부터 허브, 드라이브 트레인(drive train), 타워로 전달된다. 이러한 하중은 로터 디스크로 불어오는 바람의 난류 특성이나 날개 직경 만큼의 고도 차이에 의한 윈드 시어(wind shear), 타워에 의한 바람 교란 효과(tower shadow), 요의 부정렬(misalignment)등에 기인하여 잔류 진동을 각각의 블레이드에 유발 시킨다. 특히 윈드 시어나 타워에 의한 바람 교란 효과에 의해 각 회전 날개에서 생성되는 1회전 성분(IP)의 기계적 하중들은 2P, 3P, 4P 등의 조화성분을 가진 하중을 발생시킨다. 또한 3개의 회전날개를 갖는 풍력 터빈의 경우, 120도 만큼의 위상차에 의해 허브와 나머지 구조물에 3P, 6P 등의 진동 특성을 갖는 하중을 발생시킨다. 이러한 진동에 의한 기계적 하중은 결국 풍력 터빈의 수명을 단축시키는 결과를 초래하게 된다. 따라서 구조물의 진동을 제어하여 완하시킬 수 있는 알고리즘의 개발이 중요하게 대두되고 있다.[1]

개별피치제어(individual pitch control, IPC)는 이러한 알고리즘의 하나로써 회전 날개로부터 발생하는 기계적 하중을 최소화하는 제어 기법이다. 하지만 개별피치제어에 대한 연구를 수행하기 위해서는 두 가지의 선행 연구가 필요하다. 먼저, 풍력 터빈의 공탄성 모델(aeroelastic model)에 대한 해석이 필요하다. 풍력 터빈의 공탄성 모델은 회전 날개의 운동이나 타워의 동역학적 특성을 포함하여야 하며 그 특성들이 어떻게 변화하는지를 파악해야 한다. 일반적으로 이러한 해석은 많은 노력이 필요하다. 다행히 SymDyn이나 FAST, GH Bladed와 같은 소프트웨어를 통하여 공탄성 모델을 쉽게 추출할 수 있으며 여기서는 GH Bladed를 이용한 공탄성 모델이 사용되었다. 또 다른 선행 연구 분야는 파워 커브 추종 제어에 대한 연구로써 정격 풍속 이전에는 피치각을 고정시킨 후 출력 파워가 max-C<sub>p</sub> 커브를 따라 제어되도록 하는 구간과 정격 풍속 이후에는 통합 피치 제어(collective pitch control)를 이용하여 정격 출력 파워를 유지하도록 제어하는 구간으로 분리된다. 이에 대한 자세한 내용은 참고 문헌에 정리되어 있다.[2]

본 논문에서는 개별피치제어를 이용한 설계방법에 대하여 간략히 소개하고 간단한 비례제어기를 사용한 시뮬레이션 결과를 통해 개별피치제어의 성능을 분석하고자 한다.

## 2. 개별피치 제어의 구조와 설계

Figure. 1 은 풍력 터빈의 제어구조를 나타낸 것으로 파워 커브 추종 제어루프와 개별피치제어루프의 두 부분으로 나눌 수 있다. 개별피치제어는 각 회전 날개의 루트(root)부에서 측정된 평면 외 방향 굽힘 모멘트들을 Coleman 역 변환(P<sup>-1</sup>)을 이용하여 풍력 터빈의 tilt, yaw 모멘트로 변환시킨 후, 적절한 제어기를 통해 다시 Coleman 변환(P)을 수행하면 각 회전 날개의 입력 피치각 신호로 변환된다. 이 입력 신호에 통합피치제어에서 계산된 신호가 합산되어 풍력 터빈의 피치 액츄에이터에 구동 신호로 입력된다.[3]

회전 날개에서 측정되는 평면 외 굽힘 모멘트(M<sub>y1</sub>, M<sub>y2</sub>, M<sub>y3</sub>)는

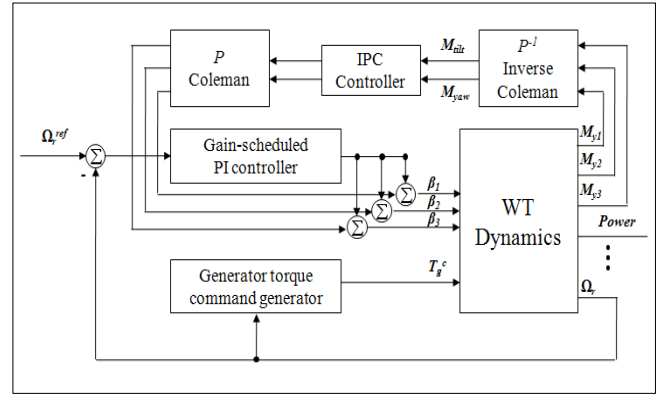


Figure 1. Structure of wind turbine control :

$M_{ave}$  = average moment                       $M_{tilt}$  = (tilting moment) × 2/3  
 $M_{yaw}$  = (yawing moment) × 2/3  
 $M_{y1}$ - $M_{y3}$  = blade 1-3 out of plane bending moment

Figure. 2 에서 보듯이 날개가 회전하기 때문에 좌표계 역시 변환하는 것을 쉽게 알 수 있다. [4] 따라서 앞서 언급한 회전좌표계의 고정 좌표계로의 변환을 Coleman 역 변환을 이용하여 식 (1) 과 같이 정리 할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} M_{ave} \\ M_{tilt} \\ M_{yaw} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{2}{3} \sin \psi & \frac{2}{3} \sin(\psi + \frac{2\pi}{3}) & \frac{2}{3} \sin(\psi + \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{2}{3} \cos \psi & \frac{2}{3} \cos(\psi + \frac{2\pi}{3}) & \frac{2}{3} \cos(\psi + \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} M_{y1} \\ M_{y2} \\ M_{y3} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{Bmatrix} M_{y1} \\ M_{y2} \\ M_{y3} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \psi & \cos \psi \\ 1 & \sin(\psi + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\psi + \frac{2\pi}{3}) \\ 1 & \sin(\psi + \frac{4\pi}{3}) & \cos(\psi + \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} M_{ave} \\ M_{tilt} \\ M_{yaw} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서,  $\psi$  = 블레이드의 회전 방위

식 (1) 에서 알 수 있듯이  $M_{ave}$  는 각 회전 날개의 루트부에서의 평면 외 방향 굽힘 모멘트의 평균값을 나타낸다. 만약  $M_{tilt}$  와  $M_{yaw}$  를 0으로 만들 수 있다면 굽힘 모멘트의 진동 성분들이 모두 제거 되고 평균값을 유지하게 될 것이라는 것을 식 (2)에서

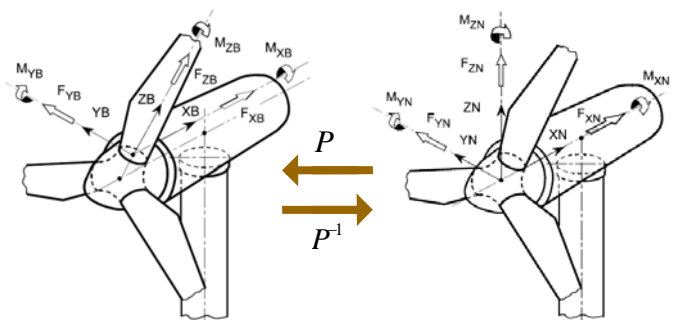


Figure 2. Coordinate transform between fixed and rotating

유추할 수 있다. 하지만 실제적으로 윈드 시어나 바람의 난류 특성 등에 의해 진동 성분을 모두 제거하는 것은 불가능하게 되고 이는 풍력 터빈에 기계적인 하중을 가하는 요인이 된다. 따라서  $M_{tilt}$  와  $M_{yaw}$  를 최대한 줄일 수 있는 적절한 제어기를 설계하는 것이 개별피치제어의 목표라고 할 수 있다.

### 3. 공탄성 모델

풍력 터빈 구조의 거대화로 인해 기계적 하중에 대한 문제가 크게 부각되고 있다. 이러한 풍력 터빈의 수학적 모델은 기계적 하중을 감소시킬 수 있는 시스템을 설계하고 평가하기 위하여 회전 날개와 타워의 유연한 운동을 모두 포함하고 있어야 한다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u) & \delta \dot{x} &= A\delta x + B\delta u, \\ y &= g(x, u) & \delta y &= C\delta x + D\delta u \end{aligned} \quad (3)$$

$$\rightarrow x = x_0 + \delta x, \quad u = u_0 + \delta u, \quad y = y_0 + \delta y$$

$$x = \begin{Bmatrix} \text{out of plane motion} \\ \text{in plane motion} \\ \text{tower fore - aft motion} \\ \text{tower side - side motion} \\ \text{azimuth angle} \\ \text{and} \\ \text{thier rates} \end{Bmatrix}, \quad u = \begin{Bmatrix} \text{collective wind} \\ \text{collective pitch} \\ \text{blade 1,2,3 pitch} \\ \text{generator torque} \end{Bmatrix}$$

여기서 사용된 GH(Garrad Hassan) Bladed 소프트웨어는 실제의 풍력 터빈과 유사하게 설계 및 시뮬레이션을 수행할 수 있는 프로그램으로써 이를 이용하여 비선형적인 풍력 터빈 시스템을 각 작동점에 대하여 선형화 시키면 식 (3) 과 같은 풍력 터빈의 선형 모델을 얻을 수 있다. 따라서 이 공탄성 모델을 이용하여 작동점 변화에 따른 풍력 터빈 시스템의 동적 특성들을 파악할 수 있다.

### 4. 시뮬레이션

Figure. 3은 개별피치제어의 성능을 검증하기 위해 Bladed를 이용하여 수행한 비선형 시뮬레이션 결과이다. 풍속 20m/s 인 정상 상태의 운전 조건에서 시뮬레이션 시작 후 50초에 0.5m/s의 풍속을 스텝 입력으로 더하였다. 기본적으로 파워커브 추종 제어가 작동하고 있는 상태이며 단지 개별피치제어의 스위치를 on/off 시킨 것이다. 또한 개별피치제어기에는 간단한 비례제어기를 사용하였으며 비례 게인 값은 20m/s 의 한 작동점에서 게인 스케줄 된 값을 사용하였다. 그림의 상단에는 각 회전 날개의 루트부에서의 평면 외 방향 굽힘 모멘트, 하단에는 coleman 역 변환을 이용하여 계산된 tilt, yaw 모멘트를 도시하였다.

20m/s 의 풍속에서는 피치각을 이용하여 출력을 제어하는 구간이기 때문에 50초 부근에서 추가적인 바람이 입력되었을 때 피치각이 작동하면서 날개의 굽힘 모멘트 값이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 각 회전 날개에는 1회전 성분의 진동이 주기적으로 나타나는 모습을 볼 수 있으며 이는 윈드 시어나 타워에 의한 바람 교란 효과에 의해 생성된 것이다.

한편, tilt 모멘트의 경우 바람이 불어오는 방향의 반대 방향으로 하중이 항상 작용하고 있음을 알 수 있으며 yaw 모멘트의 경우 바람 방향과 수직인 방향으로 하중이 작용하기 때문에 0을 기준으로 진동하는 모습을 볼 수 있다. 또한 3개의 회전 날개의 하중들이 고정 좌표로 변환 되면서  $M_{tilt}$ ,  $M_{yaw}$  에 3P 성분의 하중들이 나타나는 것을 알 수 있다.

결과적으로 개별피치제어를 위하여 간단한 비례제어기 만을 사용하였음에도 불구하고 회전 날개의 루트부에서의 굽힘 모멘트가 감소하면서 tilt, yaw 모멘트에 비례하는  $M_{tilt}$ ,  $M_{yaw}$  값도 변화한 모습을 확인할 수 있다. 특히  $M_{tilt}$ ,  $M_{yaw}$  의 평균값과 첨두값들이 작아진 것을 통해서 개별피치제어가 풍력 터빈에 가해지는 기계적 하중을 감소시켰음을 알 수 있다.

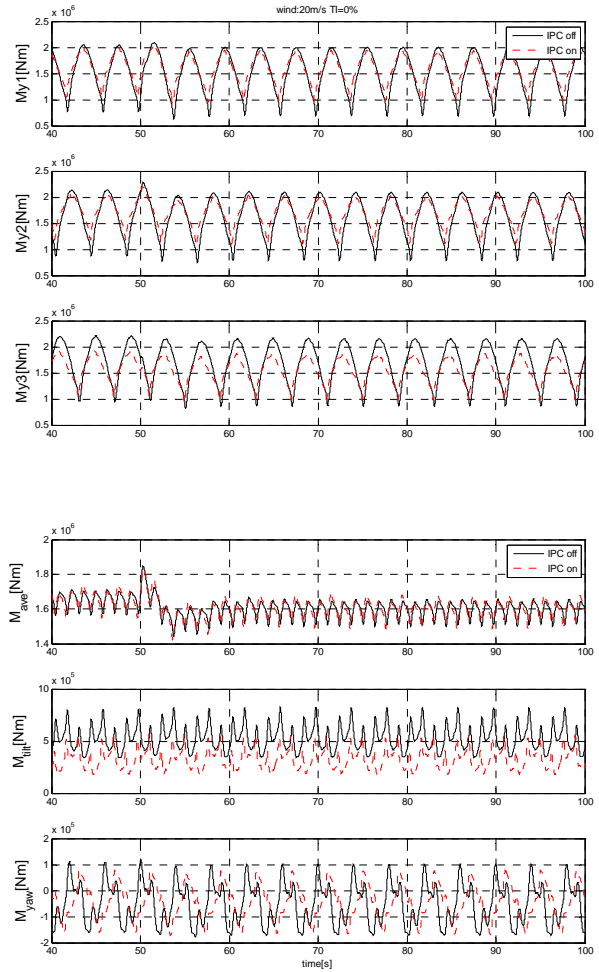


Figure 3. Nonlinear time simulation using the Bladed

### 5. 결론

풍력 터빈의 용량이 크게 증가하면서 기계적인 하중을 감소시키기 위한 연구의 하나로 개별피치제어(IPC)에 대하여 논의하였으며 이를 위해 필요한 선행 연구들을 제시하였고 기초적인 구조와 설계 방법에 대하여 설명하였다. 또한 비선형 시뮬레이션을 통하여 개별피치제어의 효용성에 대하여 검증하였다.

### 후기

본 결과물은 지식경제부의 출연금으로 수행한 에너지자원인력양성(학술진흥) 사업의 연구결과입니다.

### 참고문헌

1. E. A. Bossanyi, "Individual Blade Pitch Control for Load Reduction," Wind energy, 6, 199-128, 2003
2. Y. S. Nam, "Wind turbine Control," GS inter-vision, 2009.
3. T.G van Engelen, "Design model and load reduction assessment for multi-rotational mode individual pitch control," EWEC, 2006
4. E. A. Bossanyi, "GH Bladed User Manual," Garrad Hassan and Partners Ltd, 2009.