論文 J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(3), 210-216(2013)
DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.3.210

NREL 5MW 풍력터빈의 천이영역에서의 개별피치제어

남윤수, 라요한*

Individual Pitch Control of NREL 5MW Wind Turbine in a Transition Region

Yoonsu Nam and Yo Han La*
Dept. of Mechanical and Mechatronics Engineering, Kangwon Nat'l Univ.

ABSTRACT

Rotor blades experience mechanical loads caused by the turbulent wind shear and an impulse-like wind due to the tower shadow effect. These mechanical loads shorten the life of wind turbine. As the size of wind turbine gets bigger, a control system design for mitigating mechanical loads becomes more important. In this paper, individual pitch control(IPC) for the mechanical loads reduction of rotor blades in a transition wind speed region is introduced, and simulation results verifying IPC performance are discussed.

초 록

풍력터빈이 점차 대형화 되면서 로터 직경도 점차 커지고 있다. 로터 블레이드는 윈드 시어와 타워 교란 효과로부터 기계적 하중을 받게 된다. 이러한 기계적 하중은 풍력터빈의 수명을 단축시킨다. 풍력터빈의 크기가 커짐에 따라 기계적 하중 완화를 위한 풍력터빈 제어 시스템 설계가 중요하다. 본 논문에서는 로터 블레이드의 기계적 하중 저감을 위한 천이영역에서의 개별 피치 제어에 대해 소개하고 IPC 성능 검증을 위해 시뮬레이션을 통하여 논의한다.

Key Words : Individual Pitch Control(개별피치제어), Wind Turbine(풍력터빈), Load Reduction(하중저감), Individual Pitch Control(개별피치제어), Out-of-plane Motion(회전평면 외 운동), Transition Region(천이 영역)

Ⅰ. 서 론

지속적으로 풍력터빈의 용량이 증가하면서 기계구조물 또한 거대화되고 있다. 풍력터빈이 상업적인 경쟁력을 확보하려면, 기계 구조물들은 경량화 제작되어야 한다. 이로 인해 풍력터빈 구조물들은 낮은 감쇠비의 유연 구조물 특성을 갖게 된다. 따라서 바람에 의하여 발생된 진동하중은 풍력터빈 기계적 구조물을 지속적으로 흔들게 된다. 풍력터빈은 최소 20년 동안 작동되도록 설계되어야 한다. 하지만, 낮은 댐핑 특성으로 인한 기계적 반복 하중에 의해 풍력터빈의 수명은 줄어들게 된다[1]. 풍력터빈 제어는 바람이 갖는 파워를 최대한 회수하면서 출력 품질을 향상시키고 공력 하중을 줄이는 데에 중점을 두고 있다. 본 논문에서는 개별피치제어를 소개하고 천이영역에서의 시뮬레

† Received: June 13, 2012 Accepted: February 21, 2013
* Corresponding author, E-mail : gara8282@kangwon.ac.kr
http://journal.ksas.or.kr/
pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

Table 1. NREL 5MW Wind Turbine data

Rotor diameter	126 m
Hub height	90 m
Gearbox ratio	97
Rated rotational speed	12.1 rpm
Cut in wind speed	4m/s
Cut out wind speed	25m/s
Rated wind speed	11.3 m/s

이션 결과를 통해 성능을 검증하였다. 해석 대상 풍력터빈은 NREL(National Renewable Energy Lab.) 5MW 풍력터빈으로, Table 1에 NREL 5MW 풍력터빈의 대표적인 특성들을 정리하였다[2]. 개별피치제어기의 성능을 검증하려면, 풍력터빈의 공탄성 운동해석이 가능한 소프트웨어가 필요하다. 본 논문에서는 GL (Germanischer Lloyd)로부터 인증된 GH(Garrad- Hassan)사의 GH Bladed를 이용하여 IPC 검증이 이루어 졌다.

Ⅱ. 바람에 의한 기계적 하중

회전 직경이 100여 미터에 달하는 블레이드는 회전하면서 다양한 비대칭적 공력하중을 받게 된다. 고도 차이에 의한 윈드시어(wind shear) 현상, 타워 부근에서 바람흐름 방해에 의한 풍속의 저하, 또한 요 오차에 의한 바람의 경사 등에 의하여, 블레이드에는 불균일한 기계적 하중이 발생된다. 블레이드 하중에서 회전주파수의 1배 신호성분을 1p(per revolution), 2배 성분을 2p라고 부른다. Fig. 1은 바람에너지 분포를 주파수 별로 나타낸 파워 스펙트럼 밀도를 그린 것이다. 점과 함께 표시된 선은 정지해 있는 풍력터빈 블레이드상의 한 점이 보는 바람에너지 분포를 나타낸 것이다. 또한, 실선은 12.1rpm(=0.2Hz)으로 회전하는 블레이드 상의 한 점이 보는 바람 에너지 분포를 나타내고 있다. 동일 조건의 바람이라도, 블레이드의 상대운동에 의하여 바람에너지 분포가 변화되는 것을 알 수 있다. 이러한 현상을 블레이드 회전에 의한 바람 샘플링 효과(rotational sampling effect)라 부르는데, 이 그림에서 보듯이, 바람에너지가 1p의 하모닉 주파수대역으로 이동되어 있는 것을 알 수 있다. 따라서, 회전 블레이드에는 1p의 하모닉 성분의 기계적 하중이 주도적으로 나타나게 된다.

블레이드에 발생된 하중은 허브(hub)에서 합산되어, 동력전달축(drive train)을 통하여 타워로 전달된다. 회전 블레이드는 120° 간격의 대칭 구조로 제작된다. 따라서 풍력터빈 허브(hub), 너셀(nacelle), 그리고 타워에는 3p 주파수의 하모닉 성분들의 기계적 하중들이 주된 구성요소가 된다. 앞서도 논의하였지만, 블레이드에는 1p의 하모닉 성분 기계적 하중들이 발생하므로, 개별 블레이드의 기계적 하중 $f_i(t)$는 아래와 같이 푸리에 전개식으로 표현할 수 있다.

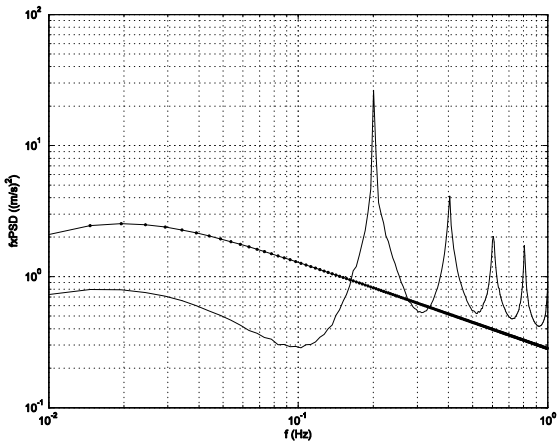

Fig. 1. Wind energy distribution

$$
\begin{aligned}
f_1(t) &= a_0 + a_1\cos\Omega t + a_2\cos 2\Omega t + a_3\cos 3\Omega t + \dots \\
f_2(t) &= a_0 + a_1\cos(\Omega t + 2\pi/3) \\
&\quad + a_2\cos(2\Omega t + 4\pi/3) + a_3\cos(3\Omega t + 2\pi) + \dots \\
f_3(t) &= a_0 + a_1\cos(\Omega t + 4\pi/3) \\
&\quad + a_2\cos(2\Omega t + 8\pi/3) + a_3\cos(3\Omega t + 4\pi) + \dots
\end{aligned} \tag{1}
$$

여기서 Ω는 블레이드 회전속도이다. 위 식들을 모두 합산하면, 기하학적 대칭성에 의해 1p, 2p, 4p, 5p 등의 주파수 성분 항들은 모두 상쇄되고, DC를 비롯한 3p 하모닉 성분의 항들만이 남게 된다. 즉, 블레이드는 1p의 하모닉 성분의 하중을 받게 되며, 허브와 너셀, 그리고 타워는 3p 성분의 하모닉 하중을 받게 된다.

Figure 2는 평균풍속 18m/s, 난류강도(turbulence intensity) 17%의 바람에 대하여, 로터의 정격 회전속도가 15.4rpm(=0.26Hz)인 2MW 풍력터빈의 블레이드와 허브에 작용하는 추력(thrust force)를 FFT 분석한 그림이다. 좌측의 FFT 결과가 블레이드 추력, 우측의 결과가 허브에서의 추력이다. 블레이드 추력에는 1p의 하모닉 성분들이, 허브에서의 추력은 3p의 하모닉 성분들이 주된 구성요소가 된다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 2의 우측 FFT 선도에서 1p 성분의 하중이 포함되어 있는데, 이것은 로터의 불균형(imbalance) 효과가 포함되어 있다는 것을 의미한다. 또한, 3p 주파수 성분이후의 하중 크기는 점점 작아지는데, 이것은 풍력터빈 기계구조물에 의한 자체적인 저역통과필터(low pass filter)의 기능에 의한 것이다.

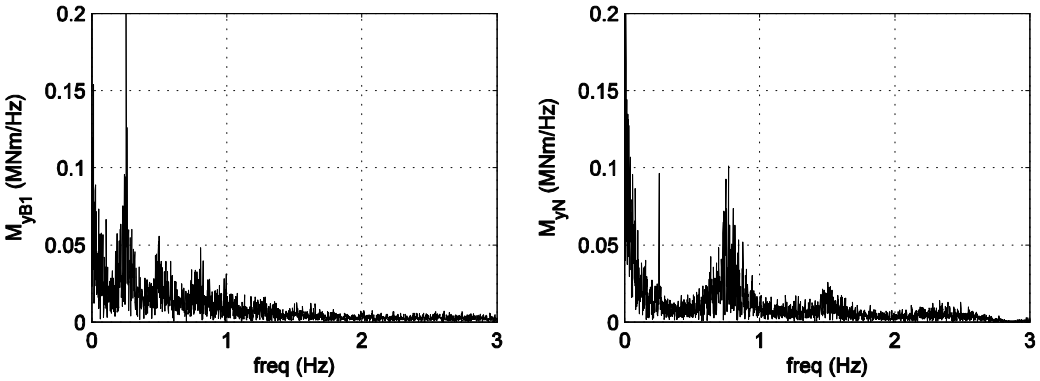

Fig. 2. FFT of blade and hub thrust force

III. 좌표계

풍력터빈 구조물의 기계적 하중을 이해하거나, 분석하려면 풍력터빈 좌표계를 잘 알고 있어야 한다. 이 절에서는 개별피치제어와 관련이 있는 3개 좌표계를 소개한다.

3.1 블레이드 회전 좌표계

Figure 3은 블레이드 회전 좌표계(blade coordinate system)로서 GL 좌표계(GL coordinate)라고도 부른다. ZB-축이 회전하면서 만드는 평면이 바로 로터 회전평면이다. 블레이드 루트부의 XB 방향 굽힘 모멘트(M_{XB})가 블레이드 평면내 운동 방향 모멘트(in-palne moment)이며, YB 방향 굽힘 모멘트(M_{YB})는 평면외 운동 방향 모멘트(out-of-plane moment)가 된다. 한편, XB 방향 힘, F_{XB}는 바람이 블레이드에 가하는 추력에 의하여 발생된 힘이다.

3.2 코드 회전 좌표계

Figure 4는 코드 회전 좌표계(chord coordinate system)로서 국지적 좌표계(local coordinate)라고도 부른다. YC-축 방향은 코드 길이 방향으로 블레이드의 뒷전(trailing edge)을 향한다. 블레이드 루트부의 XC 방향 굽힘 모멘트(M_{XC})가 블레이드 엣지방향 모멘트(edgewise moment)이며, YC 방향 굽힘 모멘트(M_{YC})는 블레이드 플랩방향 모멘트(flapwise moment)가 된다. 블레이드가 피칭 운동을 하면, XC-축과 YC-축은 피치각 만큼 회전하게 된다.

3.3 허브 고정 좌표계

Figure 5는 허브 고정 좌표계(hub coordinate system)으로 주축(min shaft axis)과 블레이드 피치축이 만나는 점에 고정시킨 좌표계이다. XN-축 회전 모멘트는 궁극적으로 발전기를 회전시키는 동력이며, 날개의 공기역학적 현상으로 발생된 공기역학적 회전 토크(aerodynamic torque)와 동일하다. YN-축 회전 모멘트(M_{YN})는 틸팅 모멘트(tilting moment)라고 부르며, 너셀을 하늘 방향으로

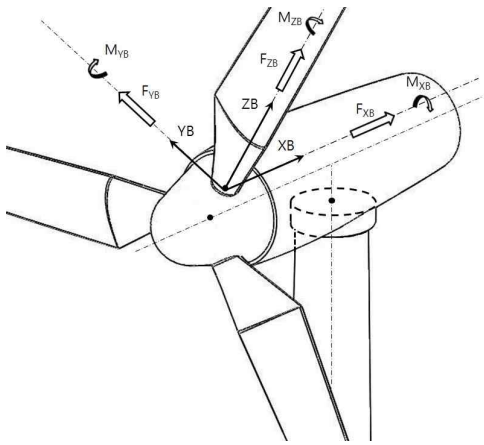

Fig. 3. Blade coordinate system

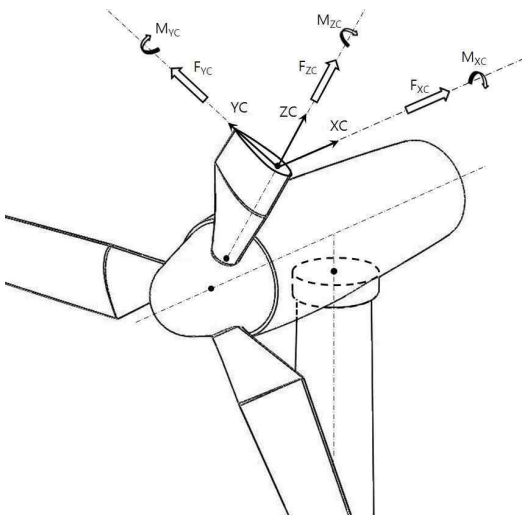

Fig. 4. Chord coordinate system

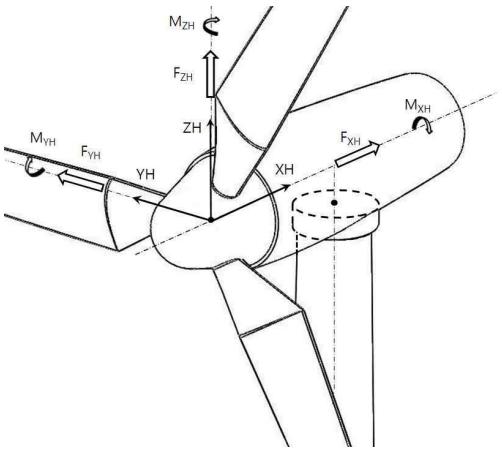

Fig. 5. Hub coordinate system

기울이게 만드는 모멘트이다. ZN-축으로의 회전 모멘트(M_{ZN})는 요잉 모멘트(yawing moment)라고 부르며, 너셀을 요잉 방향으로 회전하게 만드는 모멘트이다[3].

Ⅳ. 개별피치제어

개별피치제어는 3개 블레이드의 피치각을 각각 제어함으로써 회전 블레이드의 기계적 반복 하중 즉, 1p 성분의 하중을 줄이는 것을 목표로 한다. 풍력터빈의 규모가 대형화 될수록, 개별피치제어의 사용이 불가피하게 된다. 풍력터빈이 대형화될수록 로터 반경은 커지며, 로터 반경이 커질수록 고도 차이의 의한 윈드시어의 영향을 크게 받기 때문이다. 이 절에서는 개별피치제어의 이론과 구조 그리고 설계 방법에 대해서 논의한다. 참고문헌에 구체적인 내용이 포함되어 있다[4][5][6][7].

4.1 IPC 제어 이론

블레이드의 반복 하중을 줄이기 위해서는 통상적인 피치제어 외에 별도의 피치제어 신호가 필요하다. 광 파이버 센서를 통해 측정되는 블레이드 루트(root) 부의 평면외 방향 굽힘 모멘트 M_{YB1}, M_{YB2}, M_{YB3}와 방위각(azimuth angle) ψ 정보를 이용하여, 최종적으로 어떻게 IPC 피치 명령신호를 생성하는 가에 대하여 논의해 보자. 아래의 식 (2)는 Coleman 변환 식으로서, 블레이드 회전좌표계에서의 하중 M_{YB1}, M_{YB2}, M_{YB3}를 Coleman 좌표계에서의 하중들로 변환시킨다.

$$\begin{pmatrix} M_{F1} \\ M_{F2} \\ M_{F3} \end{pmatrix} = P \begin{pmatrix} M_{YB1} \\ M_{YB2} \\ M_{YB3} \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서, $P = \frac{1}{3}\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2\sin\psi_1 & 2\sin\psi_2 & 2\sin\psi_3 \\ 2\cos\psi_1 & 2\cos\psi_2 & 2\cos\psi_3 \end{pmatrix}$

Coleman 좌표계에서의 하중 M_{F1}은 각 블레이드에 작용하는 평면외 방향 굽힘 모멘트의 산술 평균이고, M_{F2}와 M_{F3}는 풍력터빈의 너셀을 바람 방향으로 흔드는 틸팅 모멘트(tilting moment)와 요잉 모멘트(yawing moment)에 비례하는 량들이다. 식 (2)의 역변환, 즉 Coleman 역변환을 수행하면, i-번째 블레이드 하중 M_{YBi}에 관한 아래의 식을 얻을 수 있다.

$$M_{YBi} = M_{F1} + M_{F2}\cos\psi_i + M_{F3}\sin\psi_i \quad (3)$$

위 식은 개별피치제어의 이론적 배경을 이루는 식이다. Coleman 좌표계에서의 하중인 M_{F2}와 M_{F3}의 값을 0으로 만들 수 있다면, 개별 블레이드에는 요동하는 1p 성분의 하중들이 사라지고, DC 성분인 M_{F1} 하중만 남게 된다. 따라서 반복적인 하중에 의한 블레이드의 피로파괴 가능성을 크게 줄일 수 있게 된다.

Figure 6은 회전좌표계와 고정좌표계간의 주파수 성분 이동관계를 나타내는 그림이다. M_{F2}와 M_{F3}는 허브 고정좌표계의 모멘트 량으로 볼 수 있으므로, 0p, 3p, 6p, ...의 하중 성분들로 구성되어 있다. 즉, M_{F2}와 M_{F3}는 $\cos 3\Omega t$, $\sin 3\Omega t$, $\cos 6\Omega t$, • • •의 신호성분들로 이루어진다. 따라서 식 (3)에 의하여, M_{F2}와 M_{F3}의 DC 성분은 블레이드 하중 M_{YBi}의 0p와 1p 성분과 연관된다. 이것은 싸인과 코싸인 함수의 곱을 합과 차로 변환하는 공식을 이용하면, 쉽게 증명할 수 있다. 동일한 이유로, M_{F2}와 M_{F3}의 3p 성분은 블레이드 하중 M_{YBi}의 2p와 4p와 연관된다. 위의 주파수 이동 관계가 개략적으로 표현된 Fig. 6으로부터, 개별피치제어의 목표인 블레이드의 1p 하중을 줄이려면, Coleman 좌표계에서의 하중 M_{F2}와 M_{F3}를 0으로 만들어야 한다는 것을 다시 한 번 확인할 수 있다.

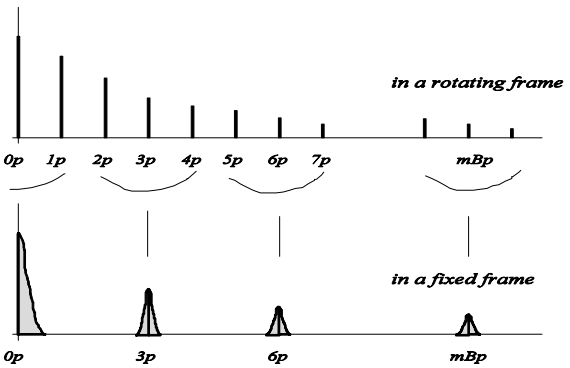

Fig. 6. Relation of frequency shift between rotating and fixed frame

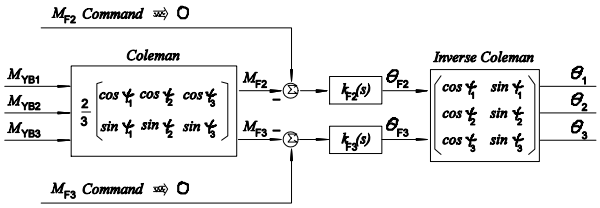

Fig. 7. Individual pitch control scheme

4.2 IPC 제어 구조

Figure 7 은 개별피치제어의 개략적인 구조이다. 풍력터빈으로부터 3개 블레이드의 하중 M_{YBi}와 방위각 ψ을 센싱하여 Coleman 변환을 하여, M_{F2}와 M_{F3}를 얻을 수 있다. M_{F2}와 M_{F3}의 제어목표값인 0과 비교되어 각각의 오차 신호가 산출되는데, 이를 0으로 만들기 위한 제어기 k_{F2}와 k_{F2}가 설계되어야 한다. 개별피치 제어기의 출력신호, 다시 말하여 Coleman 좌표계에서의 피치 구동신호 θ_{F2}와 θ_{F3}들은 Coleman 역변환을 통하여 각 블레이드에 대한 피치 명령신호로 변환된다. 개별피치제어 알고리즘으로 계산된 각 블레이드의 피치 명령신호는 통합피치제어 알고리즘에 의하여 계산된 피치제어 량과 합산되어, 각 블레이드의 피치 엑츄에이터를 구동시킨다.

개별피치제어기 설계의 요체는 허브 고정좌표계에서 틸팅과 요잉 모멘트 DC 성분의 크기를 최소화시키는 것이다. 이를 다르게 표현하면, 블레이드 회전좌표계에서 1p 성분 블레이드 하중의 크기를 최소화시키는 제어기를 설계해야 한다는 것을 의미한다. Coleman 좌표계에서의 하중 M_{F2}와 M_{F3}의 DC 성분 크기를 0으로 만들기 위하여 PI 제어기를 고려할 수 있다. 이때, 충분한 안정도 여유를 보장하면서 1p 성분 블레이드 하중을 선택적으로 최소화시킬 수 있도록, PI 제어기 게인과 필터들이 튜닝 되어야 한다.

4.3 IPC 제어기 설계

IPC 제어기를 설계하려면, Matlab/Simulink를 활용하여 IPC 루프게인의 주파수 응답을 해석하여야 한다. 풍력터빈의 운동특성은 공탄성 효과(aeroelastic)로 인하여 근원적으로 비선형이다. IPC 제어기 설계를 위한 선형 동역학 모델을 얻기 위하여, GH Bladed의 선형화 모듈이 사용되었다.

Figure 8은 풍속이 18m/s인 조건에서 선형화된 동적 선형모델을 기반으로, 개별피치제어를 포함한 피치루프의 주파수 응답을 그린 것이다. 총 10개

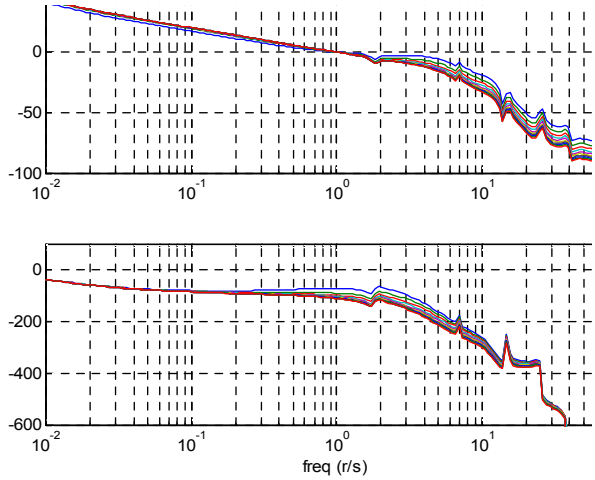

Fig. 8. Bode diagram for frequency response of IPC loop at 18m/s

Table 2. Phase margin(PM) of IPC loop

ki/kp	1	2	3	4	5
PM(deg)	107.1	88.7	80.5	76.1	73.4
ki/kp	6	7	8	9	10
PM(deg)	71.6	70.2	69.2	68.4	67.8

의 주파수 응답이 겹쳐 그려져 있는데, IPC 비례제어 게인 kp과 적분제어 게인 ki 사이의 비(ratio) ki/kp를 1에서 10까지 변경한 것이다. 교차 주파수(cross over frequency) ω_c를 1r/s이 되도록 kp를 조절하였는데, 이것은 난류특성을 고려하여 설정한 것이다. Table 2는 ki/kp 비에 따른 IPC 제어시스템의 위상여유를 보여준다. ki/kp 비가 작을수록 위상여유가 좋아지는 것을 알 수 있다. 적당한 위상여유를 선정하게 되면 ki/kp 비를 정할 수 있다. 개별피치제어기의 PI 게인들을 정확히 결정하려면, GH Bladed를 이용하여 시뮬레이션 결과를 분석한 후 게인을 최적화시켜야 한다. 결론적으로, 교차주파수를 크게 하거나 ki/kp 비율이 작을수록, 블레이드 하중 M_{YBi}의 감소 효과가 좋아지지만, 피치 응답과 로터 회전속도 응답의 표준편차가 나빠지게 된다.

Ⅴ. 천이영역에서의 IPC

천이영역이란 파워계수(power coefficient)가 최대가 되도록 제어되는 영역 (즉, 정격이전 풍속영역, 또는 토크제어 영역)과 풍력터빈의 출력이 일정하게 제어되는 영역(즉, 정격이후 풍속영역, 또는 피치제어 영역)사이의 부드러운 전환이 되도록 요구되는 운전구간을 의미한다. 천이영역에서 개별피치제어는 두 가지 방법을 택할 수 있다. 첫째

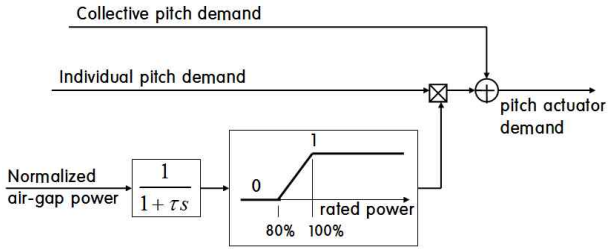

Fig. 9. IPC switching scheme in a transition region

는, 이 풍속구간에서 개별피치제어를 사용하지 않는 방법이며, 둘째는, IPC 제어를 정격이후의 풍속영역으로 부드럽게 적용하기 위하여, 천이영역에서 점진적인 on/off (fade-in and fade-out) 기능을 갖도록 IPC 제어시스템을 설계하는 것이다. 한편, 천이영역에서 블레이드 하중의 크기는 무시할 수 없는 정도이므로, 이 영역에서의 IPC 적용은 반드시 그 효과를 따져 보아야 한다.

Figure 9는 개별피치제어가 천이영역 구간에서 부드럽게 on/off 될 수 있는 스위치를 포함한 개략도이다. 3개의 제어경로를 볼 수 있는데, 제일 아래 제어경로는 IPC의 권한(authority)을 설정하는 역할을 하며, 중간의 제어경로는 Fig. 7의 구조로 계산된 개별피치제어 피치 요구량을 나타낸다. 위의 2개 경로의 결과값들은 서로 곱해지는데, 결국 IPC on/off 스위칭 기능을 수행하게 된다. 정규화된(normalized) 발전기 공극 파워(air-gap power)는 저역통과 필터링 되어 룩업 테이블(lookup table)의 입력으로 전달된다. 정격 공극파워의 100% 이상이 되면, IPC를 항상 on하며, 80% 이하에서는 항상 off시키는 되며, 그 중간은 선형적인 가중치를 주게 된다. 세 번째 제어 경로는 통합피치제어이다. IPC 제어 요구량은 최종적으로 통합피치에 의해 계산된 피치 요구량과 합산되어, 피치 엑츄에이터를 구동시키는 구조로 되어 있다.

Ⅵ. 시뮬레이션

설계된 개별피치제어의 성능을 검증하기 위하여, 평균풍속 11m/s, 난류강도 20.1%의 바람을 이용하여 NREL 5MW 풍력터빈에 대한 시뮬레이션이 수행되었다. 사용된 바람은 von Karman 난류모델을 이용하여 생성된 3차원 바람장이며, GH Bladed를 이용하여 총 600초 동안 시뮬레이션 하였다. Fig. 10은 총 600초 중 0초에서 200초 구간만 확대하여 첨부한 것이다. 이 그림의 첫째 창에는 허브 높이 풍속, 이후로 로터 회전속도, 피치각, 발전기 반력토크, 출력파워, 그리고 #1 블레이드의 평면외 방향 루트부 굽힘모멘트 하중(M_{YB1})이 순차적으로 그려져 있다. 가는 선이 IPC를 사

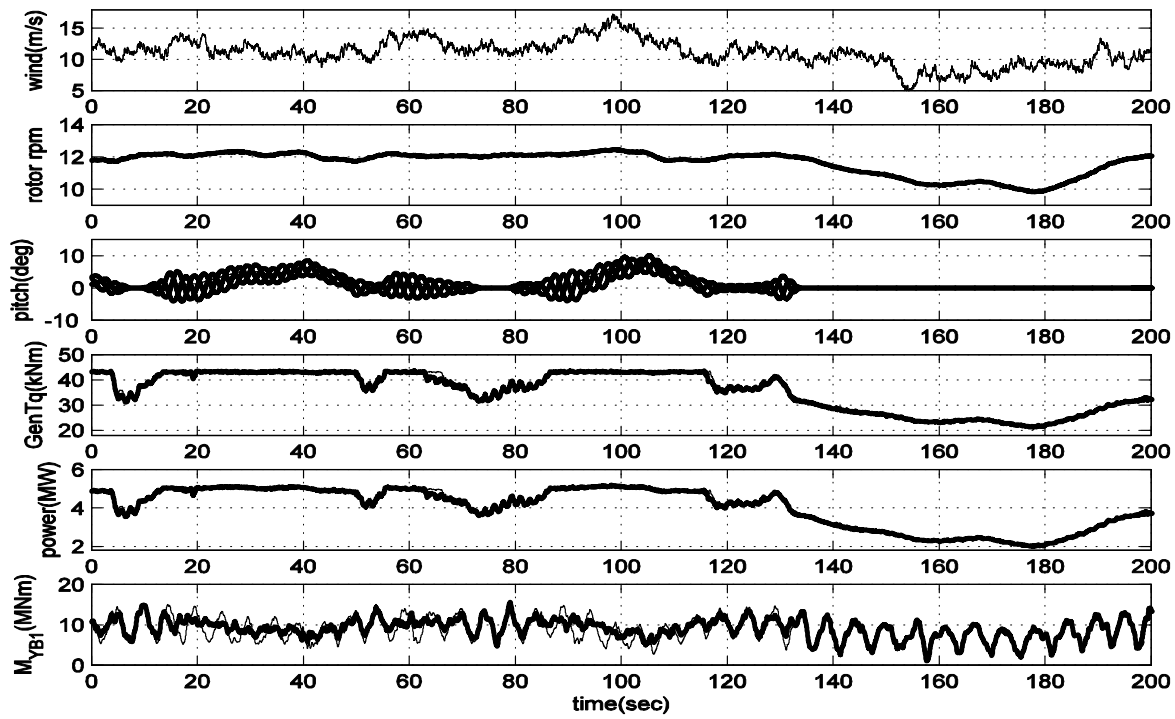

Fig. 10. Time domain simulation result

Table 3. IPC on/off quantitative analysis

	mean of rotor speed	standard deviation of rotor speed	mean of electric power	standard deviation of electric power	M_{YB1}(DEL)
unit	rpm	rpm	kW	kW	kNm
IPC off	11.6	0.949	4027	1170	6573
IPC on	11.6	0.948	4015	1163	5718
(on-off)/off(%)	0.0	-0.2	-0.3	-0.6	-13

용하지 않은 결과이며, 굵은 선으로 표현된 응답이 IPC를 사용한 결과이다. 첫째 창에 쇄선으로 표시된 풍속은 NREL 5MW 풍력터빈에 대한 정격 풍속 11.3m/s을 나타낸다. 풍속 정보를 볼 때, 대략 0초부터 130초까지는 정격 근처의 바람을 맞고 있고, 그 이후는 정격이하의 바람이 불어오고 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 Fig. 9의 IPC 제어 구조에 의하여, 대략 0초부터 130초까지의 구간에 대하여 IPC 제어가 수행되리라는 것을 예상할 수 있다. 이것은 세 번째 창에 그려진 피치 응답을 보면 자명해진다. 즉, 0초부터 130초까지 블레이드의 피치각은 각각 개별적으로 작동되고 있으며, 그 결과 여섯 번째 창에서 IPC의 적용으로 M_{YB1}하중이 크게 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 그러나, IPC가 off 상태인 130초부터 200초까지 구간에서, 각 블레이드의 피치각은 우수한 피치(fine pitch) 값인 0^o로 되어 있어, M_{YB1} 하중의 저감되지 않는다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 10의 응답에서 알 수 있는 중요한 특성 중에 하나는, 개별피치제어를 사용하여도 풍력터빈의 성능에는 별다른 영향을 미치지 않는다는 것이다. 즉, 풍력터빈의 성능에 영향을 주지 않으면서, 블레이드의 기계적 하중을 저감시킬 수 있는 방법이 바로 IPC라는 것이다.

Table 3은 개별피치제어를 포함한 풍력터빈 제어기의 성능과 블레이드 하중 특성을 정량적으로 분석하여 얻은 결과를 정리한 것이다. 이 표의 좌측에 정리된 4개의 성능지수, 즉 로터 회전속도와 출력파워의 평균과 표준편차 데이터를 보면, IPC on/off에 따라 그 결과값의 변화가 거의 없다는 것을 확인할 수 있다. 또한, 이 표의 제일 오른쪽에는 M_{YB1}의 등가피로하중(damage equivalent load, DEL) 값이 정리되었는데, 이 값은 개별피치제어가 사용되는 구간만을 선택하여 계산된 값이다. IPC의 적용으로 DEL 값이 크게 줄어들었다는 것을 확인할 수 있다.

Ⅶ. 결 론

본 논문에서는 개별피치제어(IPC)에 대한 이론과 구조에 대해 설명하였고, IPC 제어기 설계 방법에 대하여 기술하였다. 특히, 천이영역에서 부드러운 IPC on/off을 구현하는 방법을 제안하였다. 설계된 개별피치제어의 성능은 시뮬레이션을 통해 검증되었다. NREL 5MW 풍력터빈에 대하여, 천이영역에서 블레이드 루트부의 평면외 방향 굽힘모멘트 하중을 DEL 기준으로 13%까지 감소시킬 수 있음을 GH Bladed 시뮬레이션으로 입증하였다.

후 기

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (NO.2012T100201670)

References

1) Yoonsu Nam, *Wind Turbine Control*, GS intervision, 2009, pp. 178~179

2) Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W., and Scott, G., *Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development*, Technical Report NREL/TP-500- 38060, 2009, pp.1~4

3) Bossanyi, E., *GH Bladed User Manual*, Garrad Hassan, 2009, pp.99~102.

4) Bossanyi, E., "Individual Blade Pitch Control for Load Reduction," Wind Energy, Vol.6, 2003, pp.119~128.

5) Selvam, K., *Individual pitch control for large scale wind turbines*, ECN-E-07-053, 2007, pp.1~43

6) van Engelen, T., and van der Hooft, E., *Individual Pitch Control Inventory* ,ECN-C-03-138, 2005, pp.1~31

7) Bossanyi, E., and Wright, A., *Field testing of individual pitch control on the NREL CART-2 wind turbine*, EWEC 2009 European Wind Energy Conference & Exhibition, 2009, pp.1~9