

## 論文

## 풍력 발전시스템 피치 제어에 관한 연구

박종혁\*, 노태수\*\*, 문정희\*, 김지연\*\*\*

## Pitch Control for Wind Turbine Generator System

Jong-hyuk Park\*, Tae Soo No\*\*, Jung-heu Mun\* and Ji-yeon Kim\*\*\*

## ABSTRACT

In this paper, a method of designing the pitch control algorithm for the wind turbine generator system (WTGS) and results of nonlinear simulation are presented. For this, the WTGS is treated as a multibody system and the blade element and momentum theory are adopted to model the aerodynamic force and torque acting the rotor blades. For the purpose of controller design, the WTGS is approximated to 1 DOF system using the fact that the WTGS is eventually a constrained multibody system. Then a classical PID controller is designed and used to regulate the rotational speed of the generator. FORTRAN based nonlinear simulation program is written and used to evaluate the performance of the proposed controller at the various wind scenario and operational modes.

## 초 록

본 논문에서는 풍력 발전시스템의 피치 제어 알고리즘 설계 기법을 검토하고 비선형 시뮬레이션을 수행한 결과를 제시한다. 풍력 발전시스템을 다물체 시스템으로 간주하고 로터 블레이드에 작용하는 공력 및 토크 계산을 위해 블레이드 요소 및 모멘텀 이론을 근거로 공력 모델링을 수행하였다. 제어기 설계를 위해, 풍력 발전시스템은 서로 상대적 으로 구속한 체 운동하는 1 자유도 시스템으로 가정하여 선형 방정식을 수립하고, 로터 회전속도를 제어하기 위해 PID 제어기를 설계하였다. FORTRAN 언어를 기반으로 작성된 비선형 시뮬레이터 WINSIM을 이용하여 다양한 풍속 시나리오와 운전 방식에서 제어기의 성능을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

**Key Words** : Wind Turbine Generator(풍력 발전기), WINSIM, System ID, Linearization (선형화), PID Controller(PID 제어기), Pitch Control(피치 제어)

## 1. 서 론

1992년 브라질 리우에서는 지구 온난화 방지를 위해 기후 변화협약을 채택하여, 지구의 온난화의 주요 원인인 온실 가스 배출을 억제하고 온

실가스의 감축을 주요 내용으로 하는 교토의정서를 1997년에 채택하였다. 교토의정서 채택이후, 세계 각국은 지구의 환경을 보호하고 동시에 꾸준한 기술과 산업 발전의 친환경적 에너지원을 찾는 노력을 계속하였으며, 2005년 2월중 교토의정서의 공식 발효에 맞추어 이러한 노력에 더욱 박차를 가하게 되었다[1].

국내에서도 대체 에너지 개발 필요성에 대한 인식이 대두되면서, 풍력, 태양광, 바이오, 폐기물, 태양열, 수소 등 6개 기술 개발 중점 분야로 선정하여 전체 에너지 소비의 3%를 대체에너지

† 2006년 7월 18일 접수 ~ 2006년 11월 22일 심사완료

\* 정희원, 전북대학교 항공우주공학과 대학원

\*\* 정희원, 전북대학교 기계항공시스템공학부  
연락처, E-mail : rotthee@chonbuk.ac.kr  
전북 전주시 덕진구 덕진동 1가 664-14

\*\*\* 정희원, (주)코윈텍

로 공급하기 위한 대체 에너지 산업육성 정책을 꾸준히 전개하고 있다. 특히 자연 바람을 이용한 풍력 에너지에 대한 연구는 유럽과 미국 같은 선진국에서 활발하게 진행되고 있다. 유럽의 경우 풍력 발전량이 매년 10%이상 증가 하고 있으며, 미국에서도 2020년까지 총 전기에너지 생산량의 6%까지 대체에너지를 이용하여 생산할 계획을 가지고 있다[2]. 국내에서도 풍력에 관한 연구가 활발한 이루어지고 있으며, 제주도 와 대관령 등지에서 풍력 단지를 형성하여 운영하고 있다.

본 논문에서는 다몸체 역학 및 블레이드 요소 이론을 근거하여 풍력 발전시스템을 모델링 했으며, FORTRAN 언어를 기반으로 시뮬레이션 소프트웨어 WINSIM을 작성하여 풍력 발전시스템의 피치제어 알고리즘 설계 및 성능 분석을 수행하였다. 피치 제어를 수행하기 위해서는 시스템 선형화가 필수적인 절차이다. 시스템 선형화를 위해 풍력 발전시스템을 1 DOF 시스템으로 가정하여 WINSIM 및 시스템 ID 기법을 이용하여 수치 선형화를 수행하였다. 피치 제어 알고리즘 설계를 위해 고전적인 PID 제어 기법을 기반으로 제어기를 설계하였으며, 전체 시스템의 안정성을 확보하면서 단위 계단 입력에 대한 오차가 최소화되도록 PID 이득값을 선정하고 비선형 시뮬레이션을 통하여 그 성능을 확인하였다. 각 풍속과 전체 풍속에 대한 피치 제어 전략을 수립하여 PID 제어기의 작동을 통한 피치 제어를 수행하였다.

## II. 본 론

### 2.1 시스템 모델링

본 논문에서는 풍력 발전시스템을 다몸체 시스템으로 간주하여 참고 문헌[3]에 따라 전체 운동 방정식을 유도하였다. 그림 1에 도시된 이중로터 풍력 발전시스템의 블레이드, 샤프트, 발전기, 기어박스 등의 구성품을 하나의 단위몸체로 간주하여 각각 단위몸체를 운동방정식과 구속방정식을 통해 하나의 시스템으로 모델링할 수 있다. 또한 블레이드에 의한 공력은 블레이드 요소 및 모멘텀 이론에 근거하여 계산되며 각 동력 전달축 및 기어에 의한 가속 및 감속도 고려하였다 [4],[5]. 참고 문헌[5]를 통해 발전기와 주 로터의 기어비는 80:1, 보조 로터는 40:1로 기어비를 설계하였다. 또한 현대중공업에서 제공한 이중역자 유도 발전기(DFIG)를 고려하여 발전기 모델링을 수행하였다[6].

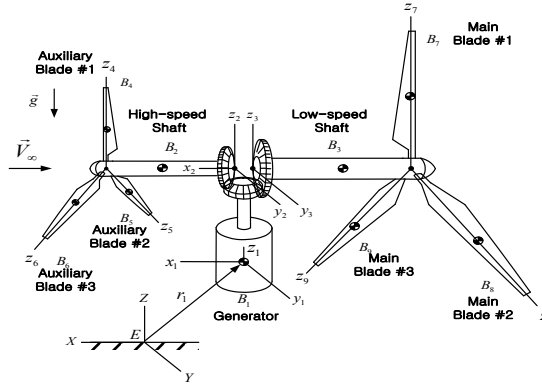


그림 1. 풍력 발전시스템

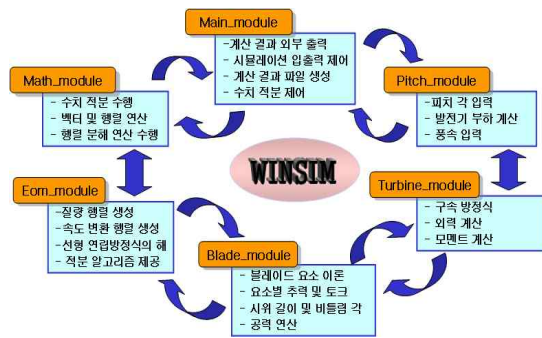


그림 2. WINSIM의 구조

## 2.2 비선형 시뮬레이션 S/W WINSIM

본 논문에서는 FORTRAN 언어를 이용하여 다몸체 시스템의 운동 해석 및 블레이드 공력 계산을 통해 풍력 발전 시스템의 성능 해석을 수행할 수 있는 시뮬레이션 소프트웨어 WINSIM을 이용하였다. WINSIM은 사용자로부터 시스템 형상과 각 몸체간의 연결부재 종류, 외력 특성 등을 입력으로 하여 운동방정식을 자동으로 형성한 후, 수치 적분을 수행함으로써 다몸체 시스템의 운동을 해석할 수 있도록 하였다. 그림 2는 WINSIM의 전체적인 구성 및 각 구성 모듈의 기능을 도시하였다. 모듈의 기능은 참고문헌[5]에 기술되어 있다.

## III. 피치 제어기 설계

### 3.1 Model Reduction

피치 제어를 수행하기 위해서 시스템 선형화는 필수적인 절차이다. 본 논문에서 제시하고 있는 시스템 동역학 모델링은 다몸체 역학에 기반

한 Recursive formulation 형태로 이루어져 있으며 FORTRAN 언어를 이용한 수치 시뮬레이션으로, 운동 방정식의 해석적 해를 구할 수 없다. 본 논문에서는 수치 선형화를 위해 풍력 발전시스템을 블레이드부터 발전기까지 모든 구성품이 서로 연결되어 구축되어 있는 다물체 시스템으로서, 궁극적으로 1 DOF 시스템으로 간주하여 식 (1)에 보인 바와 블레이드 피치각과 풍속을 입력으로 하고, 로터 회전속도를 출력으로 하는 1차의 선형 방정식으로 가정하였다[7].

$$\dot{\Omega} = A \Delta\Omega + B \Delta\theta + C \Delta V \quad (1)$$

위 식에서,  $\Delta\Omega$ 는 로터 회전속도,  $\Delta\theta$ 는 블레이드 피치각, 그리고  $\Delta V$ 는 풍속을 의미한다.

수치 선형화를 하기 위해 시뮬레이션 S/W WINSIM과 시스템 ID 기법을 사용하였다. 그림 3은 WINSIM과 시스템 ID 기법을 이용한 선형화 절차를 도시하였다. 그림에 도시된 절차를 살펴보면, 먼저 임의의 고정된 피치각과 풍속에 대하여 기준 상태를 설정한 후 시스템이 정상 상태에 도달할 때까지 시뮬레이션을 수행한다. 이후 블레이드 피치각 및 풍속을 적절하게 변화하면서 과도 응답을 기록한다. 과도 응답 결과와 Matlab에서 제공하는 System ID Toolbox의 시스템 ID 기법을 이용하여 식(1)에 필요한 시스템 상수를 구한다[8]. 그림 4와 그림 5는 System ID의 예로 기준 상태가 풍속 12m/sec, 블레이드 피치각을 10°일 때 정상 상태 도달 후 풍속 및 피치각의 입력 시나리오를 도시하였다. 그림 6은 시스템 ID를 통해 구한 선형과 비선형 모델의 과도 응답

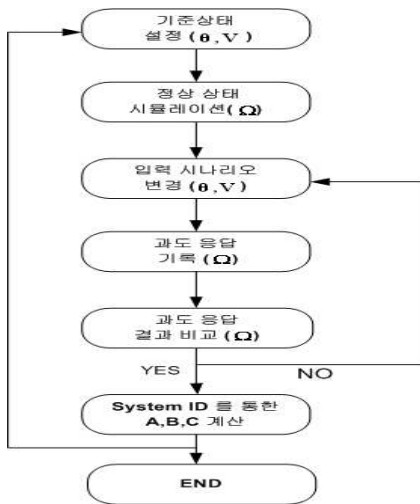


그림 3. 시스템 선형화 절차

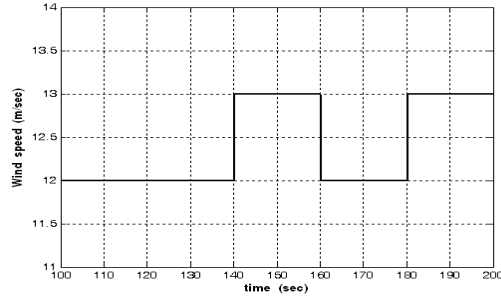


그림 4. 시스템 ID를 위한 풍속 입력 시나리오

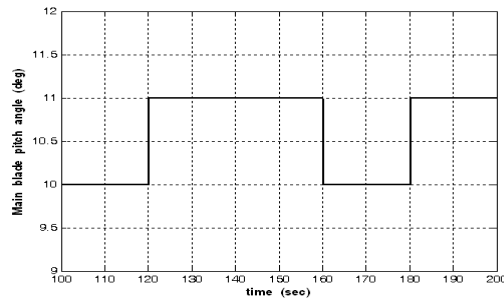


그림 5. 시스템 ID를 위한 피치각 시나리오

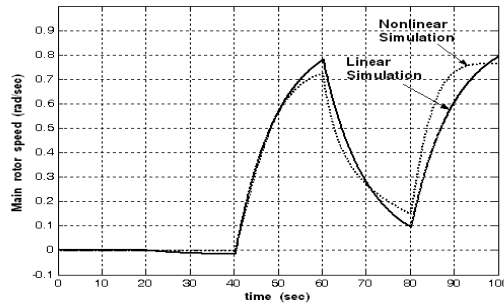


그림 6. 선형과 비선형의 시뮬레이션 결과 비교

표 1. 시스템 상수 ( $\dot{\Omega} = A\Delta\Omega + B\Delta\theta + C\Delta V$ )

Reference Wind Speed	Reference Pitch Angle	A	B	C
12	10	-0.1051	-0.1088	0.0957

결과를 도시한 것으로 두 결과가 거의 일치함을 알 수 있다. 표 1에 시스템 상수를 정리하였다.

그림 7은 다양한 풍속 및 피치 기준각에 따른 선형화 결과로서 시스템 상수가 급격하게 변하고 있지 않음을 보이고 있다. 즉, 본 논문에서 사용하고 있는 예제의 경우 기준 조건에 따른 시스템 특성 변화는 크지 않음을 의미한다.

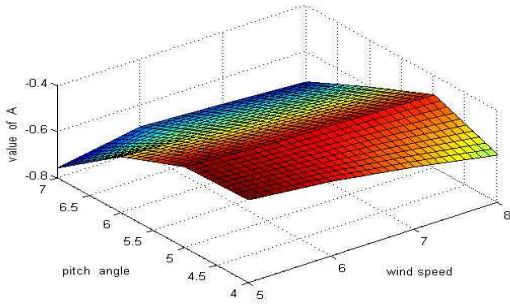


그림 7. 풍속 및 피치각에 따른 시스템 상수 (A)

3.2 피치 제어 알고리즘 설계

3.2.1 선형 시스템 구성

본 논문에서는 풍력 발전시스템을 그림 8에 도시된 블록 다이어그램을 이용하여 나타내었다. 선형 시스템의 구성요소를 살펴보면, 기준 로터 회전속도와 로터 회전속도와의 오차를 최소화하는 제어기(Controller), 제어기를 통해 나온 피치 명령각을 실제 블레이드 피치각에 적용시키는 피치 모터(Pitch Motor) 그리고 풍력발전 시스템(WTGS)으로 구성된다.

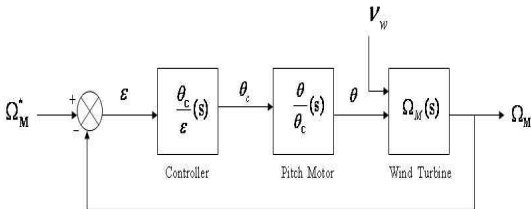


그림 8. 풍력발전 시스템 블록 다이어그램

각 구성 요소의 전달 함수를 구하기 위하여 먼저 제어기는 고전적인 PID 구조를 채택하였으며 전달 함수는 식(2)와 같다. 피치 모터의 전달 함수는 1차 지연 시스템으로 간주하여 식(3)과 같이 쓸 수 있다. 풍력 발전기의 전달 함수는 피치각과 풍속을 입력으로 하고 로터의 회전 속도를 출력으로 하는 1차 상태 미분 방정식으로 식(1)을 사용하여 식(4)와 같이 나타내었다[7].

$$\frac{\theta_c}{\varepsilon}(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s : \text{Controller} \quad (2)$$

$$\frac{\theta}{\theta_c}(s) = \frac{1}{\tau_s + 1} : \text{Pitch motor} \quad (3)$$

$$\Omega_M(s) = \frac{B}{s-A}\theta + \frac{C}{s-A}v_w : \text{Wind turbine} \quad (4)$$

전체 시스템의 전달 함수는 식(2)-(4)를 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\Omega_M}{\Omega_M^*}(s) = \frac{\frac{1}{\tau} \cdot B \cdot (K_D s^2 + K_{I}s + K_I)}{s^3 + Xs^2 + Ys + Z} \quad (5)$$

위 식에서  $\tau$ 는 피치 모터의 시상수,  $K_p, K_I, K_D$ 는 PID의 이득값을 나타내며,  $X, Y, Z$ 는 다음과 같다.

$$X = \frac{1}{\tau_A} \cdot B \cdot K_D + \frac{1}{\tau_A} - A \quad (6)$$

$$Y = \frac{1}{\tau_A} \cdot B \cdot K_p - A \quad (7)$$

$$Z = \frac{1}{\tau_A} \cdot B \cdot K_I \quad (8)$$

3.2.2 PID 제어기 Gain 값의 선정

PID 피치 제어기의 이득값을 구하기 위하여 본 논문에서는 두 단계 설계 절차를 이용하였다. 먼저 Routh-Hurwitz 안정 조건을 이용하여 전체 시스템의 안정을 보장하는 이득값의 범위를 구하였다. 즉, 식(5)로 표현되는 전체 시스템 전달 함수의 특성식인 분모의 근이 음수가 되도록 보장하는 조건과 특성식의 각 항의 계수가 양수가 되는 조건을 이용하면 PID 이득값의 범위를 다음과 같이 설정된다[9].

$$\frac{1}{\tau_A} \cdot B \cdot K_D + \frac{1}{\tau_A} - A > 0 \quad (10)$$

$$\frac{1}{\tau_A} \cdot B \cdot K_p - A > 0 \quad (11)$$

$$\frac{1}{\tau_A} \cdot B \cdot K_I > 0 \quad (12)$$

$$\left( \frac{1}{\tau_A} \cdot B \cdot K_D + \frac{1}{\tau_A} - A \right) \left( \frac{1}{\tau_A} \cdot B \cdot K_p - A \right) - \frac{1}{\tau_A} \cdot B \cdot K_I > 0 \quad (13)$$

다음 단계에서는 최적화 단계로 Matlab의 Optimization Toolbox의 최적화(Optimization)기법을 이용하여, 계단 입력과 출력 사이의 오차를 최소화하는 Cost 함수는 다음과 같이 설정하였다 [10].

$$J = \int_0^{\infty} (\Omega_M - \Omega_M^*)^2 dt \quad (14)$$

여기서,  $\Omega_M$ 와  $\Omega_M^*$ 는 각각 로터 회전속도와 기준 로터 회전속도를 의미하며, 최적의 PID 이득값을 구하기 위해 참고 문헌[10]에 제시된 예시를 이용하였다. 그림 9은 단위 계단 입력을 사용하여 식(10)-(13)을 만족하는 임의의 Nominal 이득값

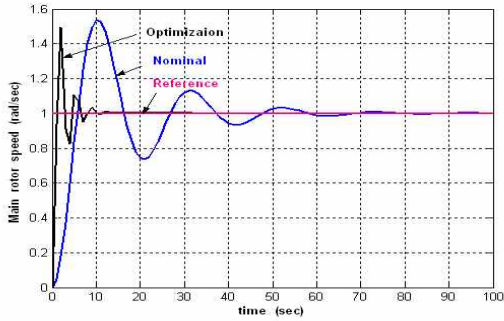


그림 9. PID 이득값을 이용한 시뮬레이션 비교

과 최적화된 이득값을 선형 시스템에 적용하여 시뮬레이션을 수행한 결과를 도시한 것으로 최적화기법을 통해 구한 PID 이득값을 적용했을 때 시스템이 안정되면서 빠르게 응답하는 것을 확인할 수 있다. 표 2는 시뮬레이션에 사용된 Nominal과 최적화된 PID 이득값을 정리하였다.

표 2. Nominal과 Optimization의 PID 이득값 비교

	P	I	D
Nominal Gain	-5	-1	-2
Optimized Gain	-135.5588	-10.5566	-27.2729

### 3.3 시스템 성능 분석

#### 3.3.1 RPM Regulation 제어

선형 시스템을 기반으로 설계된 PID 제어를 비선형 시뮬레이션 S/W WINSIM을 이용하여 성능 분석을 수행하였다. RPM Regulation 제어는 풍속의 변화에도 불구하고 피치 제어를 통해 일정한 로터 회전속도를 유지시키는 것을 목적으로 한다. RPM Regulation 제어의 예로서, 풍속 12 m/sec, 피치각 10°를 기준 상태로 설정하였다. 그림 10은 RPM Regulation 제어에 사용된 풍향 모델링을 도시한 것으로 Random Number와 sin함수를 이용하여 모델링하였다. 그림 10은 비선형 시뮬레이션을 수행한 결과를 도시한 것으로 최적화 기법을 통해 구한 PID 이득값을 사용했으며, 정상 상태에서의 로터 회전속도를 기준 입력으로 설정하였다. 시뮬레이션 시간은 300초이고 제어기는 80초 이후에 작동하도록 설정하였다. 그림 11은 기준 로터 회전속도와 로터 회전속도와의 시뮬레이션 결과를 도시하였다. 그림 10에 도시된 풍속의 변화에도 불구하고 제어기

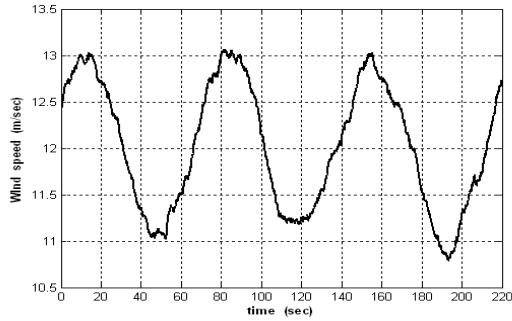


그림 10. 성능 분석을 위한 풍속 시나리오

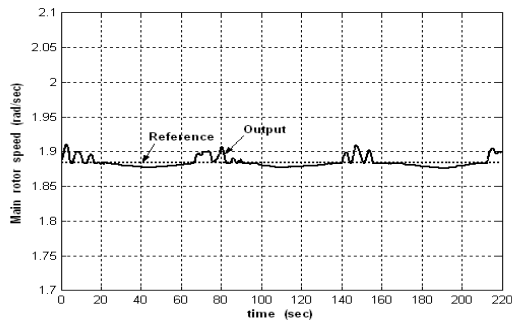


그림 11. RPM Regulation 제어 시뮬레이션

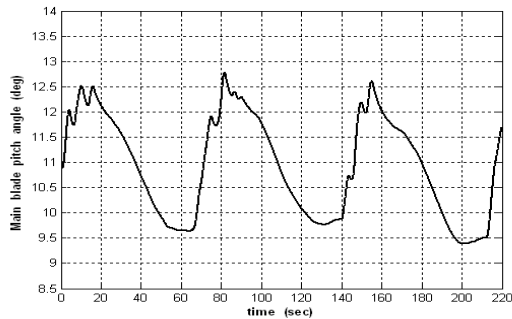


그림 12. RPM Regulation 제어에 따른 피치각

작동으로 로터 회전속도가 기준 로터 회전속도를 잘 추종하는 것을 확인할 수 있다. 그림 12는 RPM Regulation을 수행한 피치각을 도시하였다. 설정한 기준로터 회전속도를 추종할 수 있도록 풍속에 따라 피치각이 변하는 것을 확인할 수 있으며, 기준 피치각 10°와의 오차는 이득값 튜닝을 통해 오차를 최소화할 수 있다.

#### 3.3.2 RPM Tracking 제어

RPM Tracking 제어는 풍속의 변화에도 불구하고 사용자가 설정한 임의의 로터 회전속도를 추종하도록 피치 제어를 수행하는 것을 목적으로

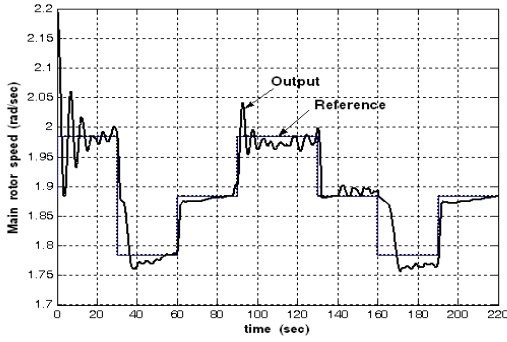


그림 13. RPM Tracking 제어 시뮬레이션

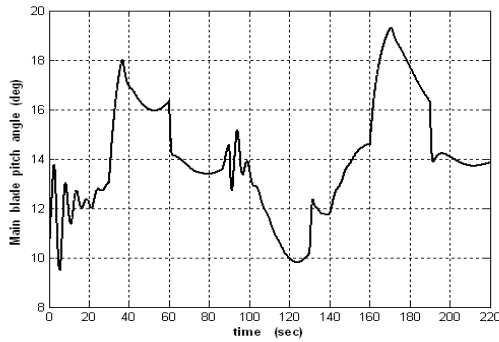


그림 14. RPM Tracking 제어에 따른 피치각

한다. 기준 상태는 풍속 12m/sec, 피치각은 10° 이고 RPM Regulation 제어에 사용된 PID 이득 값 및 풍향 모델링을 이용하였다. 그림 13은 비선형 시뮬레이션 S/W WINSIM을 이용한 비선형 시뮬레이션 결과를 도시한 것으로, 피치 제어를 통해 로터 회전속도가 기준 로터 회전속도를 잘 추종하고 있음을 확인할 수 있다. 그림 14는 기준 로터 회전속도를 추종할 수 있도록 RPM Tracking 제어에 필요한 피치각을 도시하였다.

#### IV. 피치 제어 알고리즘 구현 및 성능분석

##### 4.1 피치 제어 전략

본 논문에서는 PID 제어를 이용하여 저 풍속, 정상 풍속, 고 풍속 영역에서의 피치 제어를 수행하기 위해 풍속 영역에 따른 피치 제어 전략을 수립하였다. 그림 15는 본 논문에서 고려하는 풍력 발전시스템의 로터 블레이드 공력 성능과 발전기 성능과의 관계를 나타내는 Operation map이다. 각 로터 회전속도에 따라, 초기 시동에서 발전 개시(cut-in) 지점의 회전속도까지의 영

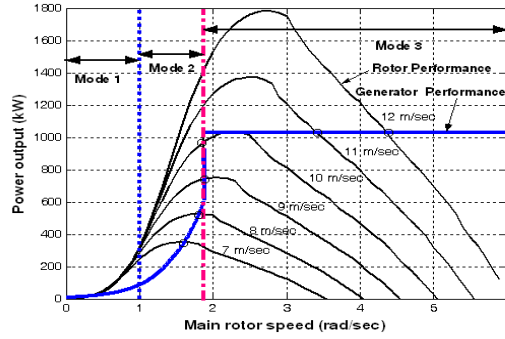


그림 15. 각 영역에 대한 피치 제어 전략

역을 Mode 1, cut-in 지점의 회전속도에서 정격 출력이 생산되는 지점의 회전속도까지의 영역을 Mode 2로 구분하였다. 또한 로터 회전속도가 정격 출력이 되는 지점의 회전속도를 초과되는 영역을 Mode 3으로 구분하여 각 영역에 대한 피치 제어 전략을 수립하였다.

먼저 Mode 1은 Max. Torque Tracking의 영역으로서 초기 시동시 로터가 cut-in 지점의 회전속도에 빠르게 도달하도록 피치 제어를 수행하였다. 초기 시동시 실속으로 인해 공력 효율이 낮아져 로터가 cut-in 지점의 회전속도에 도달하는데 시간이 지체된다. 로터가 cut-in의 회전속도까지 빠르게 도달하기 위해서는 양력 발생이 최대가 되는 지점, 즉, 최대 토크를 발생시키는 받음각을 갖도록 피치 제어 전략을 수립하였다.

일반적으로 로터의 공력 효율은 끝단속도비에 의해 결정된다. 끝단속도비는 로터 끝단의 선속도와 입력 풍속간의 비율로 다음과 같이 정의된다.

$$\lambda_{opt} = \frac{\Omega^* R}{V} \quad (15)$$

여기서,  $\lambda_{opt}$ 는 최적의 끝단속도비,  $\Omega^*$ 는 로터의 최적 회전속도,  $V$ 는 풍속을 그리고  $R$ 은 블레이드 반경이다. 따라서 정상 풍속에 해당되는 Mode 2 영역에서는 로터의 회전 속도가 최적 끝단비를 유지하도록 제어되는 Rotor RPM Tracking 방식을 취한다[11],[12]. 즉, 최적의 끝단속도비  $\lambda_{opt}$ 를 유지하도록 풍속  $V$ 의 변화에 따라 기준 로터 회전속도  $\Omega^*$ 가 바뀌어야 한다. 그러므로 로터 회전속도는 최적의 끝단속도비  $\lambda_{opt}$ 를 유지하도록 기준 로터 회전속도  $\Omega^*$ 를 추종하도록 제어되어야 한다.

고 풍속에 해당되는 Mode 3은 Rotor RPM Limitation의 영역으로서 로터 또는 발전기 회전



속도가 최대 허용 범위 미만에서 작동할 수 있도록 회전속도를 제한하여야 한다. 본 논문에서 고풍속에 의하여 발전기 또는 로터가 최대 허용 범위 내에서 회전할 수 있도록 피치 제어 전략을 수립하였다. 논문에 사용된 예제에서는 로터 회전속도의 최대 허용 회전속도를 2.5rad/sec로 설정하였다.

• Mode 1 : Max. Torque Tracking

그림 16은 풍속 6m/sec에서 피치각을 고정하여 피치 제어를 수행하지 않은 경우와 공력 토크가 최대가 되도록 Max. Torque Tracking 피치 제어를 수행한 경우에 있어서, cut-in 회전 속도까지 로터 회전속도까지 도달한 시간을 비교 도시한 그림이다. 그림에서 보듯이 피치제어를 수행했을 때 cut-in 로터 회전속도에 빨리 도달하는 것을 확인할 수 있다. 그림 17은 Max Torque Tracking 제어시 피치각의 변화를 도시한 것으로, 초기에 실속을 방지하고 최대 공력 토크를 갖도록 큰 피치각을 유지하며, 로터의 회전 속도가 증가함에 따라 설계 최적값인 피치각 0°에 도달함을 확인할 수 있다.

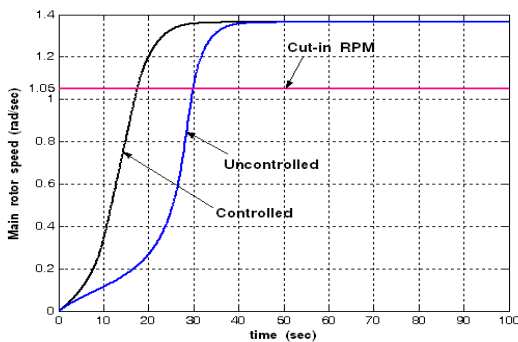


그림 16. 초기 시동에서의 로터 회전속도 비교

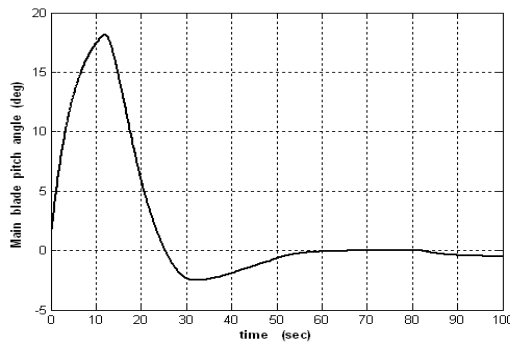


그림 17. Max Torque의 블레이드 피치각

• Mode 2 : Rotor RPM Tracking

그림 18에 기준 풍속 8m/sec를 중심으로한 풍속 시나리오를 도시하였다. 본 논문에서 고려하는 풍력 발전시스템의 로터 블레이드는 6~8에서 최대 공력 효율을 갖도록 설계된 바 본 예제에서는 최적 끝단속도비를 6으로 설정하였다. 그림 19는 설정한 끝단속도비를 유지할 수 있도록 피치 제어를 수행한 로터 회전속도의 시뮬레이션 결과를 도시한 것으로, 기준 로터 회전속도를 매우 잘 추종하는 것을 알 수 있다. 그림 20은 Rotor RPM Tracking에 의한 피치각을 나타낸다.

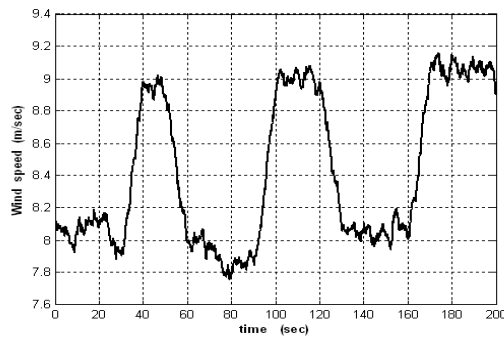


그림 18. 정상 풍속 입력 시나리오

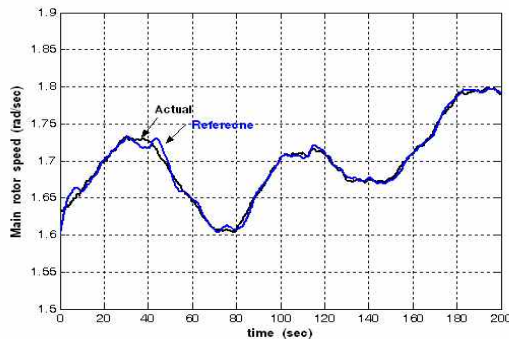


그림 19. RPM Tracking 시뮬레이션 결과

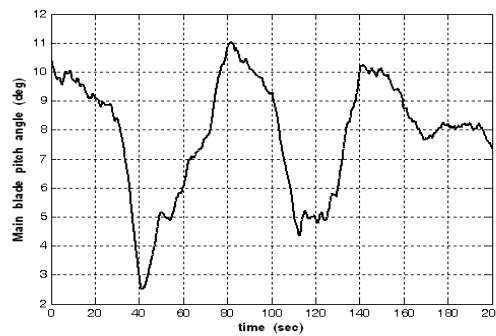


그림 20. RPM Tracking의 피치각

• Mode 3 : Rotor RPM Limitation

고 풍속영역에서는 로터 회전속도가 가용 회전범위에서 작동할 수 있도록 피치 제어를 수행하였다. 그림 21은 풍속 입력 시나리오를 도시한 것으로, 기준 풍속은 13m/sec이다. 그림 22는 설정한 기준 로터 회전속도와 피치 제어를 수행한 로터 회전속도의 시뮬레이션 결과로, 풍속의 변화에도 불구하고 기준 로터 회전속도를 잘 유지함을 확인할 수 있다. 그림 23은 Rotor RPM Limitation에 의한 피치각으로, 풍속에 따라 피치각이 바뀌는 것을 알 수 있다.

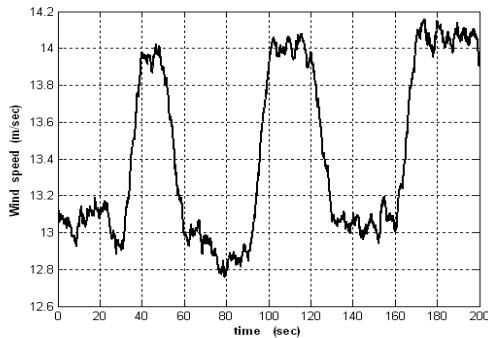


그림 21. 고 풍속 입력 시나리오

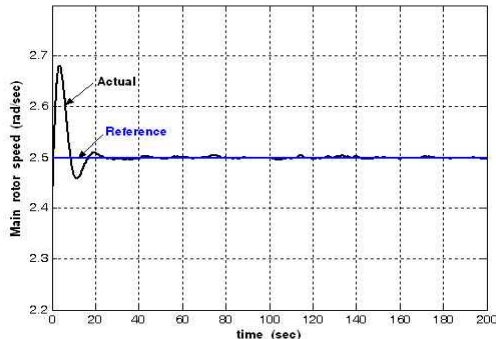


그림 22. RPM Limitation 시뮬레이션 결과

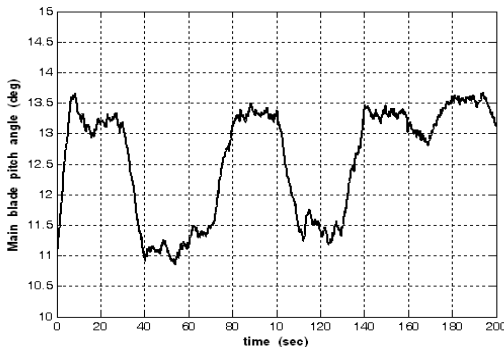


그림 23. RPM Limitation의 피치각

4.2 전체 풍속 영역에서의 피치 제어

각 풍속 영역에 대한 피치 제어전략을 근거로 전체 풍속 영역에 적용하여 피치 제어를 수행하였다. 그림 23은 앞에서 설명한 각각의 피치 제어 방법을 통합한 알고리즘을 나타내는 것으로서, 풍속과 로터 회전 속도에 따라 각 Mode의 피치 제어 전략을 자동으로 선택하여 피치 제어를 수행한다.

그림 24에 도시된 전체 영역의 피치 제어 전략을 살펴보면, 로터 회전속도가 발전 개시 회전속도인  $\Omega_{M_{low}}$  보다 작을 경우, 제어기는 Mode 1의 Max Torque Tracking 피치 제어를 수행하여 가급적 신속하게 로터 회전을 증가시킨다. 로터 회전속도가 발전 개시 속도인  $\Omega_{M_{low}}$  보다 크고 풍속이 최대 허용 풍속  $V_{max}$  보다 작을 때, 제어기는 Mode 2의 Rotor RPM Tracking 영역의 피치 제어를 실행된다. 마지막으로 발전기가 회전할 수 있는 최대 가용 범위의 로터 회전속도  $\Omega_{M_{High}}$  보다 크거나 또는 풍속이 고풍속  $V_{max}$  을 초과할 경우, 제어기는 Mode 3의 Rotor RPM Limitation에 따라 로터가  $\Omega_{M_{High}}$  속도를 유지하도록 제어된다.

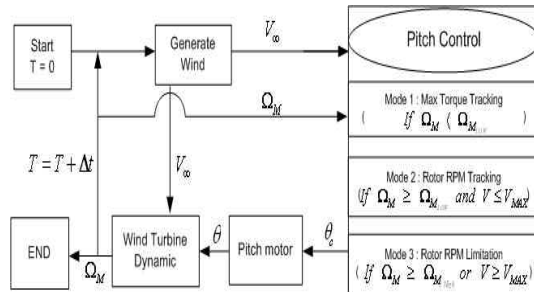


그림 24. 전체 영역에서의 피치 제어 전략

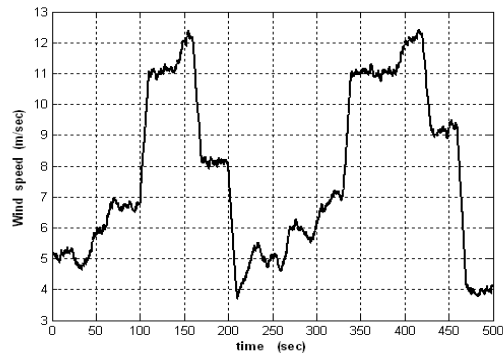


그림 25. 전체 영역에 대한 풍속 시나리오



그림 25는 전체 풍속 영역에 대한 입력 시나리오를 도시한 것으로, 시간에 따라 저 풍속, 정상 풍속, 고 풍속이 모두 포함된 풍황 시나리오를 설정하였다.

그림 26은 그림 25에 도시된 풍황 모델을 이용하여 피치각을 고정하여 피치 제어를 수행하지 않은 로터 회전속도와 피치 제어를 수행한 로터 회전속도와의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 시간이 0~50초 사이는 초기 시동 절차로 로터가 cut-in 지점의 로터 회전속도까지 빠르게 도달하도록 피치 제어를 수행하는 Mode 1의 Max Torque Tracking 영역이다. 그림 26을 살펴보면, 제어가 작동으로 피치 제어를 수행한 로터 회전속도가 기준 로터 회전속도 보다 cut-in 지점의 로터 회전속도에 빠르게 도달한 것을 확인할 수 있다. 50~100초 사이는 정상 풍속으로 Mode 2의 Rotor RPM Tracking 영역에 해당된다. 공력 효율이 최대가 되는 최적의 끝단속도비를 유지하는 기준 로터 회전속도를 추종하는 것을 확인할 수 있다. 100~150초 사이는 로터가 과속으로 인한 기계적 결함을 방지하기 위해 최대 허용 범위 미만에서 작동하도록 하는 Mode 3의 Rotor RPM Limitation 영역으로 피치 제어를 통해 최

대 허용 범위인 2.5rad/sec미만에서 작동하는 것을 확인할 수 있다. 150~350초 사이는 Mode 2의 영역으로 피치 제어를 통해 로터가 최대 공력 효율을 갖도록 tracking 하는 것을 알 수 있다. 350~430초 사이는 로터가 최대 허용 범위를 초과하여 회전하고 있으므로, Mode 3의 Rotor RPM Limitation 영역으로 피치 제어를 통해 로터가 허용 범위 미만에서 회전하는 것을 확인할 수 있다. 마지막으로 430~500초 사이는 Mode 2의 Rotor RPM Tracking 영역으로 로터 회전속도가 최적의 끝단속도비를 유지하는 기준 로터 회전속도를 tracking하는 것을 알 수 있다.

그림 27은 풍속과 로터 회전속도에 따른 해당 Mode에서의 피치각을 도시한 것으로, 초기 시동 시 최대 토크를 발생시키는 지점까지 피치각이 증가한 후 최적의 피치각 0°로 복귀하는 것을 확인하였다. 정상 풍속에서는 최대 공력 효율이 발생하도록 최적의 피치각 0°를 유지하는 것을 확인할 수 있으며, 고 풍속에서는 로터 회전속도가 허용 범위 미만에서 작동하도록 피치각이 증가하는 것을 알 수 있다.

### III. 결 론

본 논문에서는 풍력발전 시스템의 빠른 시동, 최적 운용, 그리고 시스템 보호를 위한 피치 제어 전략의 수립과 비선형 시뮬레이션을 이용한 성능 해석 결과를 제시하였다. 풍력발전 시스템은 전형적인 Constrained 다물체 시스템으로서 제어기 설계 목적상 1DOF 시스템으로 간주하고, 비선형 시뮬레이션과 시스템 ID기법을 이용하여 선형 모델을 추출하였다. 피치 제어를 위하여 고전적인 PID 구조의 제어기를 기반으로 안정성을 보장하고 기준 입력을 정밀하게 추종하도록 제어 이득값을 설정하였다. 비선형 시뮬레이션 소프트웨어 WINSIM을 이용하여 다양한 풍속 조건에서 시스템 운용을 최적화할 수 있음을 예시하였다.

### 후 기

이 연구는 전북대학교 누리사업단에서 지원한 “풍력발전 시스템 동역학 모델링 및 Identification에 관한 연구” 결과의 일부임을 밝히며 연구비 지원에 감사드립니다. 또한 WINSIM S/W와 Dual-Rotor 풍력발전시스템 제원을 사용하게 허락하신 (주)코원텍에도 감사드립니다.

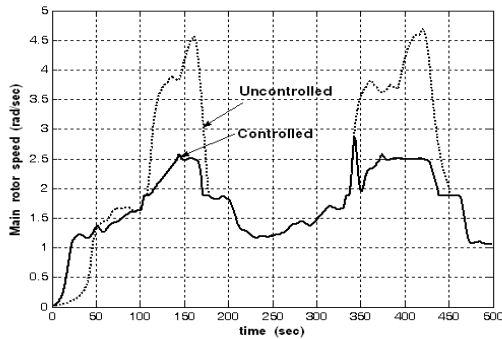


그림 26. 전 영역에서 비선형 시뮬레이션 결과

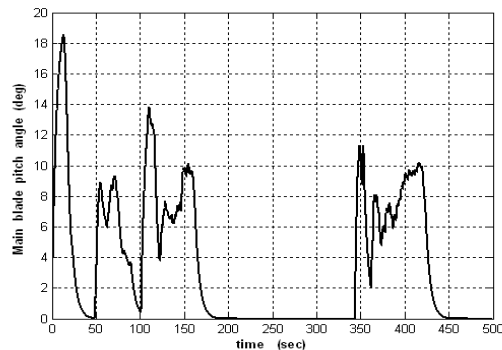


그림 27. 풍속 및 회전 속도 변화에 따른 피치각

## 참고문헌

- 1) 강승진, "교토의정서 발효의 의미", 에너지경제연구원, 이슈진단, pp. 6-22, 2005. 01
- 2) 권영일, 나도백, 조홍곤, "풍력 발전", 한국과학기술정보연구원, 심층정보, 분석보고서, 2002. 12
- 3) 노태수, "다몸체 시스템의 운동 방정식 형성 방법", 한국항공우주학회지, 제 22권, 제 6호, pp. 134-140, 1994
- 4) 민병문, 노태수, 최석우, 송승호, "다몸체 역학을 이용한 수평축 풍력 발전 시스템 모델링", 전력전자학회지, 제9권 1호, 2004. pp. 1-9
- 5) 조윤모, "Dual-rotor 풍력발전 시스템 모델링 및 성능해석에 관한 연구", 석사학위 논문, 전북대학교, 2005
- 6) Hyundai Heavy Industries CO. LTD., Specification for Three Phase Induction Generator, Ref. APP-44653RM11576, 2004
- 7) Hand, M. M., "Variable-Speed Wind Turbine Controller Systematic Design Methodology : A Comparison of Non-linear and Linear Model-Based Design", NREL Technical Report, 1999
- 8) Lennart Ljung, "System Identification Toolbox", The Mathworks, User's Guide, Version 6, 2005
- 9) Norman S. Nise., "Control Systems Engineering", Jhon Wiley & Sons, Fourth Edition, Ch. 6, 2004
- 10) The Mathworks, "Optimization Toolbox for Matlab", Tutorial for Users, 2004
- 11) Aalborg University and Riso National Laboratory., "Simulation platform for modeling, optimization and design of wind turbines", Project 2001-2003
- 12) Anca D. Hansen, Florin Iov, Poul Sorensen, Frede Blasbjerg, "Overall control strategy of variable speed doubly-fed induction generator wind turbine", Nordic Wind Power Conference, 2004