

# 시뮬레이션 기반의 풍력발전제어시스템 최적화 기법에 관한 연구

田耕言\*, 魯泰洙<sup>†</sup>, 金國善<sup>\*\*</sup>, 金志彦<sup>\*\*\*</sup>

## A Study on Simulation-based Optimization for Wind Turbine Controller Tuning

Gyeong-Eon Jeon, Tae-Soo No, Guk-Seon Kim, and Ji-Yon Kim

### 요 약

본 논문에서는 기설계된 풍력발전제어시스템의 최적화에 관한 연구로서, 특히 블레이드 피치제어기 및 발전기 토크 제어기의 제어 변수 튜닝 (Tuning) 기법을 제안하고자 한다. 일반적으로 제어기 설계는 간략화된 수학적 모델을 기반으로 이루어지고 실제 적용시 설계단계에서 고려하지 않았거나 수학적 표현이 불가능한 불확실성을 제어 시스템에 반영하기 위하여 반복적인 시험 단계가 필요하다. 본 논문에서는 풍력발전시스템 비선형 시뮬레이션 소프트웨어와 최적화 기법을 이용하여, 풍력발전기의 로터 회전 속도 변화, 발전기 출력 변동, 동력 전달축 비틀림 진동을 최소화하기 위한 제어기 튜닝 절차 및 결과를 제시하고자 한다. 제어기 기본 설계안과 최적화된 최종 설계안의 비교를 통하여 방법의 타당성을 예시하였다.

### ABSTRACT

This paper presents a method of optimizing the blade pitch and generator torque controllers which have been already designed for an existing wind turbine generator system. Since the highly nonlinear and uncertain characteristics of the wind turbine generator can not be fully considered in the controller design phase, some parameters such as control gains must be tuned during the field implementation phase. In this paper, nonlinear simulation software, which is based high fidelity wind turbine model, and optimization technique are effectively combined and used to tune a set of gains for the blade pitch and the generator torque controllers. Simulation results show that the baseline controllers can be effectively optimized to reduce the errors in wind turbine rotor speed and generator power output controls as well as twisting of the high and low speed shafts.

**Key Words** : Wind Turbine Generator Control System, Control Gain Tuning, Nonlinear Simulation, Optimization, Blade Pitch Control, Generator Torque Control

## 1. 서 론

현재 전 세계적으로 화석 에너지 고갈에 따른 대체 에너지원 개발과 무분별한 화석 에너지 사용으로 인한 환경오염을 줄이기 위해 신재생 에너지 분야의 관심과 투자가 활발히 이루어지고 있는 추세이다. 특히 풍력 발전 분야의 투자 규모는 매년 증가 추세로서 현재 전 세계 전력 생산량에서 풍력발전시스템이 차지하는 범위가 점차 증가되는 추세이다. 초기에 풍력발전시스템 개발은 유럽을 중심으로 이루어졌던 반면에 현재는 북미를 시작으로 아시아에 이르기까지 전 세계적으로 풍

<sup>†</sup>교신저자 : 정회원, 전북대 항공우주공학과 교수  
E-mail : rotthee@jbnu.ac.kr

\*정회원, 전북대 항공우주공학과 대학원 박사과정

\*\*정회원, 전북대 항공우주공학과 대학원 석사과정

\*\*\*정회원, 전북대 전기공학과 대학원 박사과정

접수일자 : 2011. 6. 20                      1차 심사 : 2011. 7. 15

2차 심사 : 2011. 8. 19                      3차 심사 : 2011. 9. 9

심사완료 : 2011. 9. 19

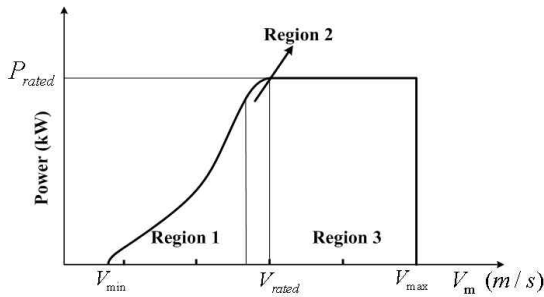


그림 1 풍력 터빈 파워 커브  
Fig. 1 Wind Turbine Power Curve

력발전 분야 투자와 개발이 활발히 이루어지고 있는 추세이고 그 규모는 매년 증가할 것으로 전망된다. 우리나라도 신재생 에너지 분야를 21C 첨단 사업으로 선정하여 정부와 기업을 중심으로 투자와 연구가 활발히 진행 중이다. 아직까지 풍력발전 분야가 국내 총 전력생산에 미치는 영향이 미비하나 새만금, 대관령, 제주도 등 여러 곳에 대규모 단지를 조성하여 전력 생산량을 점차 확대해 나가고 있다.<sup>[1,2]</sup> 하지만 국내에서 가동 중인 풍력발전시스템 대부분이 해외에서 제작되었거나 해외 기술을 이용하여 국내에서 면허생산으로 제작된 시스템을 이용하는 실정이다. 그렇기 때문에 풍력발전시스템 개발에 있어서 제어시스템 설계는 기술의 국산화와 시장성 향상에 있어서 중요하다.

일반적으로 풍력발전의 제어는 그림 1에 보인 바와 같이 크게 3가지 영역으로 구분하여 수행한다. 정격 풍속( $V_{rated}$ ) 이하인 저풍속 영역, 즉 Region 1 영역에서는 블레이드의 피치각을 최적값으로 고정하고, 발전을 위한 반력 토크를 적절하게 조절하여 공력으로 부터 최대의 전력을 생산할 수 있는 제어 전략을 취한다.<sup>[3]</sup> Region 2과 Region 3은 고풍속 영역으로서, 로터의 회전 속도 및 발전기 출력 파워가 정격을 유지 또는 넘지 못하도록 블레이드 피치 각 및 발전기 제어 토크를 능동적으로 제어한다. 특히, 이 영역에서는 로터, 회전축, 타워에 작용하는 공력 또는 구조적 부하를 최소화하여 피로 누적을 방지하는 것도 중요한 목적이다.

풍력발전제어 시스템은 기본적으로 풍력발전기 로터에 인가되는 공력 제어를 위한 블레이드 피치 제어기와, 발전기에 인가되는 반력 토크 제어기로 구성되어 있다. 일반적으로 고전적인 PID를 이용한 블레이드 피치 제어기는 선형 제어기로서 로터의 회전 속도와 발전기 출력을 서로 독립적으로 제어하기 때문에 상호 연관성이 고려되지 않는 단점이 있다. 따라서 비선형

토크 제어기를 결합하여 이용한다.<sup>[4,5]</sup> 또한 LQ 및 LQG 제어기를 이용한 제어 기법 및 선형 강건 제어를 이용한 제어 방법도 소개되었다.<sup>[6]</sup> 앞서 설명한 대부분의 제어기 설계는 특정한 작동점을 기준으로 선형화된 모델링, 또는 One-mass, Two-mass와 같이 간단한 동역학 모델에 근거하고 있다. 따라서 실제 적용 단계에서는 제어기를 구성하는 제어 변수의 조정 (Tuning)이 필수적이다. 이 과정에서는 제어기 설계시 고려하지 않은 각종 비선형성, 센서 오차의 고려, 새로운 성능 기준 (Performance measure) 등이 고려되기에 당초에 설계된 기본 설계안 (Baseline control)과 매우 다른 결과를 얻을 수 있다.

본 논문에서는 기설계된 제어기 기본 설계안을 실제 현장 적용시 필수적으로 고려해야할 성능 기준에 적합하도록 제어기에 사용되는 설계 변수를 효과적으로 Tuning하는 기법을 제시하고자 한다. 기설계된 기본 설계안으로서, 블레이드 피치 제어기에 가장 폭넓게 사용되는 PID 제어기<sup>[4]</sup> 및 Two-mass 모델링에 근거한 비선형 토크 제어기<sup>[5-8]</sup>를 사용하였고, 로터 회전 속도 오차, 발전기 출력 오차, 그리고 구동축의 뒤틀림 최소화를 성능 기준으로 설정하였다. 비선형 시뮬레이션을 통하여 기본 설계안과 최적화된 설계안의 차이 및 개선점을 확인할 수 있다.

## 2. 풍력발전시스템 모델링

### 2.1 공력 및 시스템 동역학 모델링

그림 2와 같이 Two-mass model은 풍력발전기 터빈 로터, 저속 동력 전달축, 고속 동력 전달축, 그리고 발전기와 같이 풍력발전시스템의 핵심적인 동특성을 감안할 수 있는 모델로서 당 분야의 연구에서 가장 폭넓게 인용되는 수학적 모델이다.<sup>[5-8]</sup>

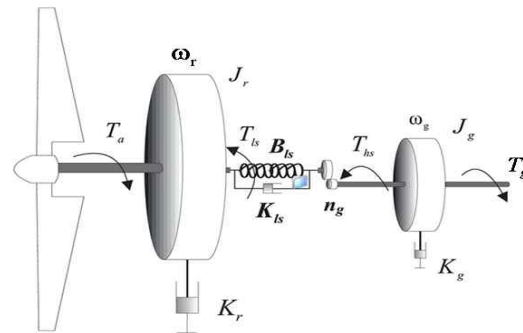


그림 2 Two-mass 풍력 터빈 모델링  
Fig. 2 Two-mass Wind Turbine modeling

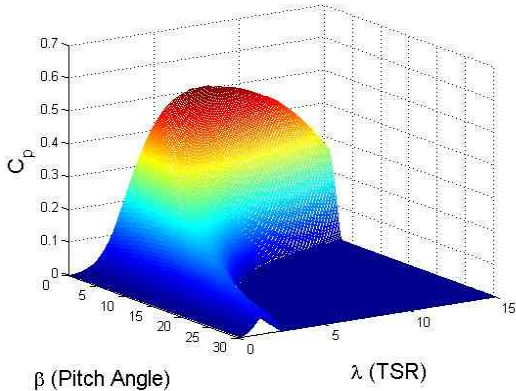


그림 3 풍력 터빈 발전 계수  
Fig. 3 Wind Turbine Power Coefficient

먼저 풍력 로터 터빈 측면에서, 공력 토크  $T_a$ 와 동력 전달축 반력 토크  $T_{ls}$ 를 고려한 풍력 로터 터빈의 회전 운동 방정식은

$$J_r \dot{\omega}_r = T_a - T_{ls} - K_r \omega_r \tag{1}$$

와 같으며, 위 식에서  $J_r$  = 터빈 로터 관성 모멘트,  $\omega_r$  = 로터 회전 각속도,  $K_r$  = 로터 회전 댐핑 계수이다. 일반적으로 공력 토크  $T_a$ 는 다음의 수식과 같이 표현되며

$$T_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 \left( \frac{C_p}{\lambda} \right) V_{wind}^2 \tag{2}$$

여기서  $V_{wind}$  = 풍속,  $\beta$  = 블레이드 피치각,  $R$  = 로터의 반경,  $\lambda$ 는 풍속과 로터 끝단의 속도비를 의미하는 선단 속도비, 그리고  $C_p$ 는 블레이드 피치각( $\beta$ )과 선단 속도비( $\lambda$ )에 의하여 결정되는 동력 계수이다. 그림 3은 대표적인, 그리고 본 연구에서 사용된 동력 계수  $C_p$ 를 도시하고 있다.

고속 및 저속 동력 전달축의 비틀림에 의하여 풍력 로터에 작용하는 반발 토크  $T_{ls}$ 는 간단히 비틀림 강성과 댐핑 효과만을 고려하여 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$T_{ls} = K_{ls} (\theta_r - \theta_{ls}) + B_{ls} (\omega_r - \omega_{ls}) \tag{3}$$

위 식에서  $K_{ls}$  및  $B_{ls}$ 는 동력 전달축의 특성을 나타내는 강성 및 댐핑 계수이고,  $\theta_r$ 은 로터의 회전각을

의미한다. 또한  $\theta_{ls}$ 와  $\omega_{ls}$ 는 증속 기어비를 고려한 발전기의 회전각 및 회전 각속도를 나타낸다.

식 (2)와 유사하게, 발전기의 회전 운동방정식은

$$J_g \dot{\omega}_g = T_{hs} - K_g \omega_g - T_g \tag{4}$$

과 같이 쓸 수 있으며, 여기서  $T_{hs}$  = 동력 전달축에 의한 구동 토크,  $T_g$  = 발전기 반력 토크,  $J_g$  = 발전기 회전 관성 모멘트,  $\omega_g$  = 발전기 회전 속도를 의미한다. 일반적으로 풍력 로터와 발전기는 증속 기어 박스를 통하여 연결되어 있으므로 동력 전달축에 의한 반발 토크, 발전기의 실제 회전 속도, 발전기의 실제 회전각도는 다음과 같은 구속 관계를 갖는다.

$$n_g = \frac{T_{ls}}{T_{hs}} = \frac{\omega_g}{\omega_{ls}} = \frac{\theta_g}{\theta_{ls}} \tag{5}$$

여기서  $n_g$  = 증속 기어비이다. 따라서 식 (2)~(5)를 정리하면 다음과 같다.

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_g \\ \theta_r \\ \theta_g \end{bmatrix}, \dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \dot{\omega}_r \\ \dot{\omega}_g \\ \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_r} (T_a - T_{ls} - K_r \omega_r) \\ \frac{1}{J_g} (T_{hs} - K_g \omega_g - T_g) \\ \omega_r \\ \omega_g \end{bmatrix} \tag{6}$$

앞서 설명한 바와 같이, Two-mass model 기반의 풍력발전시스템 모델의 특징은, 풍력 로터의 회전, 발전기 회전, 증속 기어비, 동력 전달축의 비틀림 진동, 그리고 비선형 공력 모델과 같이 가장 핵심적 고려 사항을 모두 포함하고 있다.

### 2.2 블레이드 피치제어기

일반적으로 블레이드 피치제어기의 운용에 있어서, 저풍속 영역에서는 피치각을 최적 설계각(보통의 경우 0 deg.)을 유지한 채 실질적인 제어를 수행하지 않는다. 그러나 고풍속 영역에서는 과도한 공력 토크 입력을 방지하는 목적으로 터빈의 공력 효율을 저하시키기 위하여 능동적인 피치 제어를 수행한다.

본 연구의 목적은 새로운 제어기 설계 기법이나 결과를 제시하는 데 있지 않고, 기설계된 제어기의 최적화 튜닝에 있으므로, 통상적으로 가장 많이 사용되는 고전적 PID 피치 제어기를 선정하였다.<sup>[4,5]</sup> 그림 4에

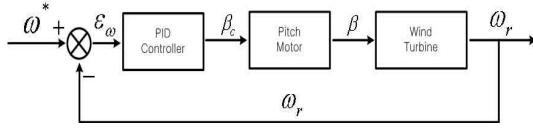


그림 4 피치 제어기 (PID)  
Fig. 4 Pitch Controller (PID)

전형적인 피치 제어 시스템의 구조를 도시하였다. 이러한 피치 제어기는 특정 작동점을 기준으로 선형화된 모델에 근거하여 주로 터빈 로터의 회전 속도 제어를 위하여 사용된다. 제어 명령은 기준 속도  $\omega^*$ 와 로터 회전 속도  $\omega_r$ 의 차이를 이용하여 다음과 같은 식을 이용하여 결정된다.

$$\beta_c = K_p \epsilon + K_i \int \epsilon dt + K_d \frac{d\epsilon}{dt} \quad (7)$$

여기서 제어 이득  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ 는 시스템 안정성을 고려하고 과도 및 정상 응답에 대한 설계 사양을 만족하도록 근계적, 주파수 응답 해석을 통하여 결정된다.<sup>[15,16]</sup> 그러나 이러한 제어 이득은 단순히 터빈 로터의 회전속도 제어 관점에서 결정되기에 실제 시스템의 타 제어기 (예를 들어, 발전기 토크 제어기) 및 동력 전달축 비틀림 특성 등은 전혀 반영되어 있지 않다.

### 2.3 발전기 토크 제어기

본 연구에서 적용한 발전기 토크 제어기는 참고문헌 [5]에 제시된 방법을 확장하여 Two-mass model을 기반으로 재설계하였다. 우선 발전기 출력 파워는

$$P_e = \omega_g T_g \quad (8)$$

이고, 발전기 출력파워가 기준 출력파워  $P^*$ 를 유지하도록 출력 오차를 다음과 같이 정의할 때

$$\epsilon_p = P^* - P_e \quad (9)$$

출력 오차가 아래와 같은 1차 미분방정식을 만족하도록 하면

$$\dot{\epsilon}_p + N_p \epsilon_p = 0 \quad (10)$$

와 같으며, 여기서  $N_p$ 는 제어기 설계 변수로서 항상 양의 값을 갖도록 설정된다.

$$\dot{P}^* - \dot{T}_g \omega_g - T_g \dot{\omega}_g + N_p \epsilon_p = 0 \quad (11)$$

여기서 기준 출력 파워  $P^*$ 의 변동이 크지 않다고 가정하고, 식(4)를 식(11)에 대입하여 정리하면

$$\dot{T}_g = \frac{1}{\omega_g} \left\{ N_p \epsilon_p - \frac{1}{J_g} (T_{hs} T_g - T_g \omega_g K_g - T_g^2) \right\} \quad (12)$$

이고, 궁극적으로 발전기 토크 제어를 위한 비선형 동적 제어 (Nonlinear, dynamic) 명령식을 구할 수 있다.

위와 같이 설계된 토크 제어기에 있어서, 설계 변수  $N_p$ 는 발전기의 동특성과 제어 정확도를 근거하여 설정되나, 블레이드 피치 제어기나 동력 전달축의 비틀림은 고려되고 있지 않았기에 실제 적용시 튜닝이 필요하다.

### 3. 시뮬레이션 기반의 최적화

앞서 설명한 바와 같이, 블레이드 피치 제어기 및 발전기 토크 제어기는 독립적으로 설계되었으며, 핵심적인 동특성 및 상호에 미치는 영향은 고려되지 않고 있기 때문에 제어기의 최적화 튜닝이 필요하다.

일반적인 최적화 문제는 아래 수식과 같이 성능지수를 최소화함과 동시에

$$J = J(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (14)$$

다음과 같은 동적, 정적 구속 조건 (Equality Constraint 또는 Inequality Constraint)을 만족하는 설계 변수  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 를 구하는 과정이다.<sup>[10]</sup>

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (15)$$

$$h(\mathbf{x}) = h(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (16)$$

$$g(\mathbf{x}) = g(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0 \quad (17)$$

이러한 최적화 문제 풀이에 있어서 성능지수 및 구속 조건을 나타내는 각종 식들은 물론 동적 구속식을 나타내는  $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x})$ 를 Explicit하게 표현할 수 있어야 하지만 실제 풍력발전시스템은 각종 기계적, 전기적 구성품들이 상호 복잡하게 연계되어 있어 필요한 수식들을 Explicit하게 전개하는 것이 거의 불가능하다.

따라서 본 논문에서는 그림 5와 같이 Two-mass 기

표 2 기준 제어기와 최적 제어기 성능 비교

Table 2 Performance Comparison between Baseline and Optimized Controllers

	Blade Pitch Gain (PID), Generator Power Gain ( $N_p$ )	Pitch Angle S/D [deg]	Rotor Speed S/D [rad/s]	Generator Power S/D [MW]	Torsional rate S/D [deg/s]
Baseline Controller	$K_p = -50$ $K_i = -5$ $K_d = -20$ $N_p = 20$	1.2241	0.0314	0.0208	0.0271
Optimized Controller $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 = 1$	$K_p = -1037$ $K_i = -56.24$ $K_d = -157.37$ $N_p = 16.01$	1.1090	0.0038	0.0093	0.0037

※S/D : Standard Deviation

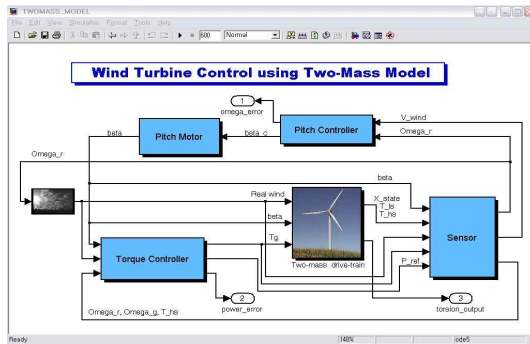


그림 5 풍력 터빈 시뮬레이션 소프트웨어  
Fig. 5 Wind Turbine Simulation S/W

반의 풍력발전시스템 비선형 시뮬레이션 소프트웨어 환경을 최적화 과정에 직접 사용하였다. 이러한 시뮬레이션 환경의 장점은 제어기 설계시 고려하지 않은 시스템 비선형성, 난류가 포함된 풍속 모델, 제어기간 상호 연동이 충분히 고려된다는 것이다. 시뮬레이션 Matlab/Simulink 기반으로 작성되었고, 최적화 Solver는 동 소프트웨어가 제공하는 툴박스를 이용하였다.

#### 4. 적용 예제

##### 4.1 설계 변수 및 성능 기준

본 논문에서는 궁극적으로 최적화하고자 하는 변수

는 블레이드 피치 제어기에 사용되는 제어 이득 ( $K_p, K_i, K_d$ )과 발전기 토크 제어기에 사용되는 설계 변수  $N_p$ 에 국한된다. 최적화하기 위한 성능지수로서 다음을 사용하였다.

$$J = \min \left( \alpha_1 \sum_{i=1}^n (\omega_{\max} - \omega_{r,i})^2 + \alpha_2 \sum_{i=1}^n (P^* - P_{g,i})^2 + \alpha_3 \sum_{i=1}^n (\omega_{r,i} - \omega_{g,i}/n_g)^2 \right) \quad (18)$$

위 수식의 성능지수에서 첫 번째 항은 풍력 터빈 로터의 회전속도 오차, 두 번째 항은 발전기 출력 오차, 그리고 세 번째 항은 동력 전달축의 비틀림 진동을 최소화하기 위한 목적이다. 그리고  $\alpha_i$ 는 각 고려 항목의 상대적 중요성을 결정하는 가중치이다. 기타 풍력발전시스템의 제원은 표 1에 정리하였다.

표 1에 제시된 풍력발전시스템 특성에 있어서 Blade의 공력 특성은 참고문헌 [14], 그리고 동역학 모델링 및 시스템 제원은 참고문헌 [5]를 인용하였다.

##### 4.2 시뮬레이션 결과

본 논문에서 그림 6에 보인 바와 같이 평균풍속 13m/s, Turbulence Intensity 8%의 고풍속 영역을 기

표 1 풍력 터빈 제원

Table 1 Wind Turbine characteristic

Rated Power ( $P_{rated}$ )	1 MW
Rated Wind Speed ( $V_{wind}$ )	12 m/s
Rated Rotor Speed ( $\omega_{rated}$ )	3 rad/s
Rotor Diameter ( $R$ )	30.3 m
Blade Section	NACA63(3)418
$C_p$ max	0.5092
Rotor inertia( $J_r$ )	$3.25 \times 10^5$ kg.m <sup>2</sup>
Generator inertia( $J_g$ )	34.4 kg.m <sup>2</sup>
Shaft damping coefficient( $K_s$ )	9900 N.m/rad/s
Shaft stiffness coefficient( $B_s$ )	$2.691 \times 10^5$ N.m/rad/s
Rotor friction coefficient( $K_r$ )	27.36 N.m/rad/s
Generator friction coefficient( $K_g$ )	0.2 N.m/rad/s
Gearbox ratio ( $n_g$ )	80

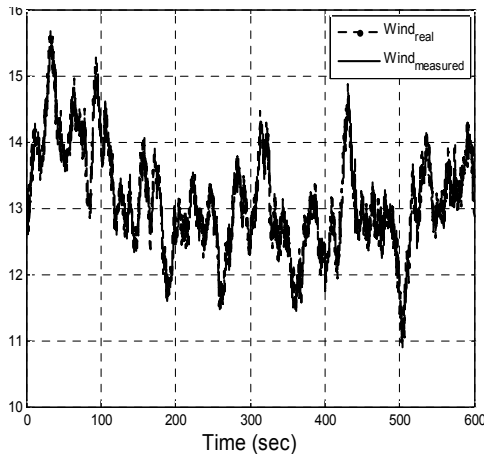


그림 6 풍황 모델 시나리오  
Fig. 6 Wind Model Scenario

준으로 최적화를 수행하였다. 풍황 모델 Wind<sub>real</sub>은 Kaimal Spectra를 기반으로 모델링되었으며 Tower Shadow와 Rotational Turbulence가 고려된 풍황 모델이다.<sup>[8]</sup> Wind<sub>measured</sub>는 Wind<sub>real</sub> 값을 1차 전달함수 형태의 Filter를 통과시켜 얻은 결과로서 단순히 풍속 측정 과정을 묘사하기 위함이다.

표 2에 최초 기본 설계안과 최적화된 설계 결과를 상호 비교하였고, 주요 변수의 시간 변화 결과를 근거

로 평균값에 대한 분산정도를 나타내는 표준 편차 수치 값으로서 성능을 검증하였다. PID 블레이드 피치 제어기 기본 설계(Baseline Controller)에 있어서 제어 이득값은 Routh Stability 조건을 이용하여 시스템 전체 전달함수의 극값(Pole)이 안정화되는 즉, 음의 값을 갖도록 제어 이득 값의 범위를 결정하고 최종적으로 계단 입력에 대한 실제 응답과의 차이를 최소화하는 값을 사용하였다.<sup>[12,13]</sup> 발전기 토크 제어기 기본 설계 변수  $N_p$ 는 발전기의 기계/전기적 특성을 감안한 응답 시상수 0.05초를 근거하였으며 수치적 실험을 통하여 발전기 출력 응답 오차가 가장 최소화하는 값을 선정하였다.

표 2 및 그림 7-10에 보인 시뮬레이션 결과에서 기본 설계안의 개선 효과를 분명하게 확인할 수 있다. 그림 7에서 최적화된 피치 제어기가 기본 설계안에 비하여 활발한 것은 제어 이득 증가에 따른 자연스런 현상이며, 블레이드 회전속도 (그림 8), 발전기 출력 파워 (그림 9) 제어 성능이 월등하게 개선되었음을 보여 주고 있다. 특히 그림 10은 기어비 효과를 고려한 로터 및 발전기의 회전속도 차이로서 동력 전달축 비틀림 진동을 나타내는 척도이다. 결과에서 쉽게 파악할 수 있듯이 진동 저감 효과가 우수함을 알 수 있다. 또한, 그림 11은 시간변화에 따른 블레이드 로터 회전속도와 피치각의 변화를 나타낸 결과로서 본 논문에서 제시한 제어기 이득 값 조정(Tuning) 방법이 블레이드 로터 회전 속도 변화를 일정하게 유지시키는 것을 확인할 수 있다. 이는 고품속 및 난류 효과가 고려된 풍속에서도 기계적 부하를 최소화할 수 있음을 의미한다.

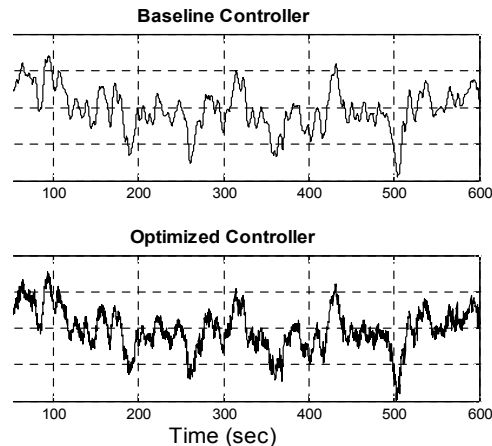


그림 7 피치각 (deg)  
Fig. 7 Pitch Angle (deg)

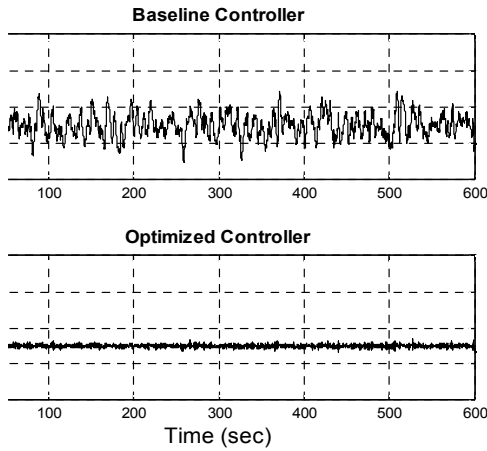


그림 8 블레이드 로터 회전속도 (rad/s)  
Fig. 8 Rotor Speed (rad/s)

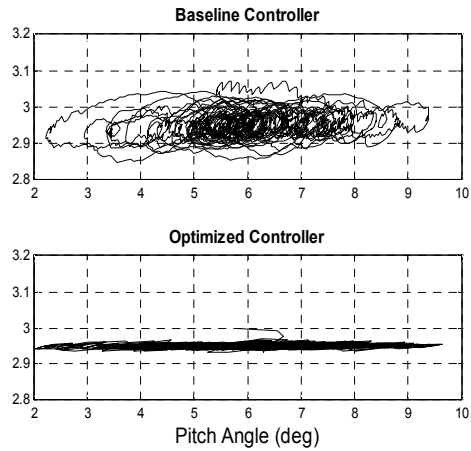


그림 11 풍력발전시스템 작동점 변화  
Fig. 11 Wind Turbine System Operation Point

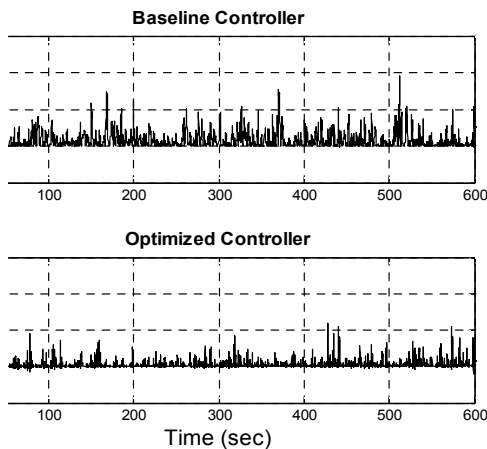


그림 9 발전기 파워 (MW)  
Fig. 9 Generator Power (MW)

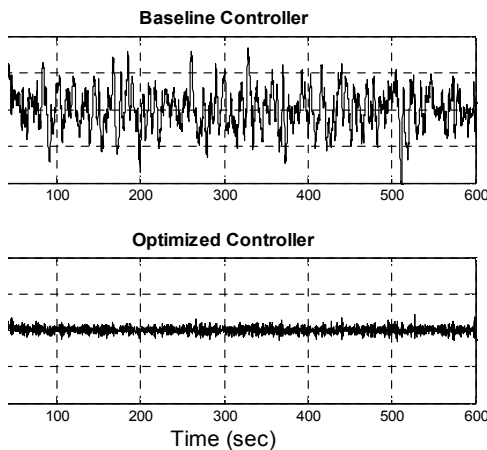


그림 10 로터축 비틀림 각속도 (deg/s)  
Fig. 10 Torsional Rate (deg/s)

## 5. 결 론

본 논문에서는 기설계된 풍력발전제어시스템이 새로운 요구 조건을 만족하도록 제어 설계 변수를 재설정하는 방법으로서 시뮬레이션 기반 최적화 기법을 제안하였다. 적용 예제로서 풍력 터빈 로터의 회전 각속도 제어를 위한 PID 형식의 블레이드 피치 제어기와, 발전기 출력 제어를 위한 발전기 토크 제어기를 동력 전달 회전축의 진동 감소라는 추가적인 목적을 달성하도록 최적화하였다. 비선형 시뮬레이션을 통하여 제안된 방법의 타당성을 검증하였고, 이론적으로 설계된 제어기를 실제 장착할 때 반드시 필요한 제어기 튜닝 절차에 관한 실질적이고 현실적인 대안을 제시하였다.

본 연구는 2011(3차년도)년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20093021020030)

## 참 고 문 헌

- [1] 류지윤, "풍력발전의 국내·외 기술 개발 현황과 향후 전망", 환경보전협회, 환경보전 2005.
- [2] 이은창, 모세준, "국내 풍력발전산업의 전망과 경쟁력 분석", 산업연구시리즈, 제17호, 2009.
- [3] Fernando D. Bianchi, Hernán De Battista and Ricardo J. Mantz, "Wind Turbine Control Systems : Principles, Modelling and Gain Scheduling Design", Advances in Industrial Control.

[4] E. Mulijadi and C.P. Butterfield, "Pitch-Controlled Variable-Speed Wind Turbine Generation", NREL, 1999.

[5] Boubekeur, Houria. "Nonlinear Control of a Variable-speed Wind Turbine Using a Two-Mass Model", *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol. 26, No. 1, 2011, March.

[6] 권순형, 송승호, 최주엽, 정승기, 최익, "PMSG 풍력발전시스템에서 전원 저전압 발생시 비틀림 진동 동특성 시뮬레이션", *2011년도 전력전자학술대회 논문집*, pp. 242-244, 2011. 7.

[7] Ahmed G., Abo-Khalil, Dong-Choon Lee, "Wind Turbine Simulation Including Pitch Angle Control, Shaft Torsional Vibration and Tower Effect", *2005년 전력전자학술대회 논문집*, pp. 411-413, 2005. 7.

[8] Yoonsu Nam, Jeonggi Kim, Insu Paek, Young-Hwan Moon, Seog-Joo Kim, Dong-Joon Kim, "Feedforward Pitch Control Using Wind Speed Estimation", *Journal of Power Electronics*, Vol. 11, No. 2, pp. 211-217, 2011. 3.

[9] Yao, X., Guo, C., and Xing., Z., "Pitch regulated LQG controller design for variable speed wind turbines", *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Chnagchun, China, 2009, August.

[10] Slotine, J., J. E and Li, W., "Applied Optimal Control", NJ. USA: Pretence Hall, 1991.

[11] Florin Iov, Anca Daniela Hansen, Paul Sørensen, Frede Blaabjerg, "Wind Turbine Blockset in Matlab/Simulink", Aalborg University, 2004.

[12] 박종혁, 노태수, 문정희, 김지연, "풍력 발전시스템 피치 제어에 관한 연구", *한국항공우주학회*, 제36권, 2호, pp. 202-209, 2008.

[13] 박종혁, "풍력 발전시스템 피치 제어에 관한 연구", 석사학위논문, 전북대학교, 2007.

[14] 문정희, "풍력발전시스템 시뮬레이션 S/W 개발에 관한 연구", 석사학위논문, 전북대학교, 2009.

[15] Norman S. Nise, "Control Systems Engineering, Third Edition", John Wiley & Sons, Inc.

[16] Charles L Phillips, Royce D. Harbor, "Feedback Control Systems, Fourth Edition". International Edition.

저 자 소 개



**전경언(田耕言)**

1981년 3월 19일생. 2008년 전북대 항공우주공학과 졸업. 2010년 동 대학원 항공우주공학과 졸업(석사). 2011년~현재 전북대 대학원 항공우주공학과 박사과정



**노태수(魯泰洙)**

1961년 2월 13일생. 1984년 서울대 항공공학과 졸업. 1989/1992년 미국 Auburn Univ. (석사/공학박). 1992년~1995년 항공우주연구원 선임연구원. 1995년~현재 전북대 항공우주공학과 교수.



**김국선(金國善)**

1985년 3월 20일생. 2011년 전북대 항공우주공학과 졸업. 2011년~현재 전북대 항공우주공학과 석/박사 통합과정.



**김지연(金志彦)**

1973년 12월 31일생. 1998년 전북대 항공우주공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년~현재 동 전기공학과 박사과정 수료. (주)효성 과장.