

부유식 해상풍력시스템의 제어기 설계

조민지^{1)*} · 박성수^{2)**}

Design of Control Algorithm for Floating Offshore Wind Turbines

Minji Jo^{1)*} · Sungsu Park^{2)**}

Received 26 November 2014 Revised 14 May 2015 Accepted 14 May 2015

ABSTRACT We present a collective blade pitch control algorithm for floating offshore wind turbines. Control objectives are to regulate the rated power of a generator and to maintain the stability of platforms in region 3. To achieve these, the optimal control method with integral action is basically used with a Kalman filter. The Kalman filter is designed to estimate the wind speed as well as wind turbine and platform states. The performances of the designed controllers are tested and verified by comparing the standard deviations of the assigned parameters of our controllers with those of the standard controllers, according to the IEC standard conditions.

Key words Floating offshore wind turbine(부유식 해상 풍력 터빈), Collective pitch control(통합 피치 제어), LQRI(최적 적분 제어), Kalman filter(칼만 필터)

Nomenclature

A : azimuth averaged state matrix

B : azimuth averaged actuator gain matrix

C : azimuth averaged output state matrix

J : cost function

K : state feedback control gain matrix

K_I : integral gains

M_p : overshoot

P_a : generator power, kW

T_g : generator torque, Nm

T_g^{cmd} : command generator torque, Nm

t_p : peak time

t_r : rise time

t_s : settling time

u : control inputs vector

u_d : disturbance inputs vector

v : average wind speed, m/s

x : state vector

y : measurements vector

z : disturbance wind speed state vector

z_p : augmented state

β : blade pitch angle, deg

β^{cmd} : command blade pitch angle, deg

$\dot{\psi}$: generator speed, rpm

1) 세종대학교 항공우주공학과 E-mail: minjijo11@gmail.com
Tel: +82-2-3408-3769

2) 세종대학교 항공우주공학과 E-mail: sungsu@sejong.ac.kr
Tel: +82-2-3408-3769

Subscript

ARE : algebraic riccati equation

- DLC : design load case
- FAST : Fatigue, Aerodynamics, Structure, and Turbulence
- IEC : International Electrotechnical Commission
- LQR : linear quadratic regulator
- LQRI : linear quadratic regulator with integral
- MIMO : multiple-input, multiple-output
- NREL : National Renewable Energy Laboratory
- NSS : normal sea state
- NTM : normal turbulence model
- SISO : single-input, single-output
- STD : standard deviation

1. 서론

오늘날 풍력은 수많은 국가에서 상대적으로 값이 싼 재생 가능 에너지를 제공하며 탄소가 거의 없는 전기를 생산한다.¹⁾ 그러나 육상풍력발전의 발달로 인하여 풍력터빈이 대형화 되면서 설치 장소의 한계가 드러나게 되었고 소음문제, 설치 및 운반문제, 시각적인 위압감 등이 문제로 야기되었다. 따라서 이러한 육상풍력발전의 문제점을 해소하기 위한 해결책으로 해상풍력발전이 고안되었으며, 기술적인 어려움과 높은 비용에도 불구하고 해상풍력발전이 점차 인기를 끌고 있다.²⁾ 해상 풍력 시스템 중에서도 부유식 해상 풍력 시스템은 상대적으로 새로운 연구 분야이며 제어 목적은 바람이 갖는 파워를 최대한 회수하여 정격 파워를 출력하는 것과 동시에 플랫폼의 안정성을 확보하는 것이다. 이를 위한 기준 제어기는 NREL로부터 모델과 함께 제시되었는데, 이는 SISO(단일 입출력) 시스템으로 게인 스케줄링을 이용한 비례-적분 제어기이다.³⁾ 이후에 해상 풍력모델이 자세히 소개되면서 MIMO(다중 입출력) 시스템의 필요성이 언급 되었고⁴⁾ 점차 FFSB(전 상태 피드백)에 이어 추정기(estimator)를 적용한 제어 및 새로운 전략들이 연구되어져 왔다.⁵⁾ 특히, 해상풍력모델의 경우 플랫폼의 피치 각도의 변화가 플랫폼의 안정성에 주요한 요소로 작용된다는 것이 연구되었는데 부유식 해상 풍력 시스템으로는 Spar-Buoy형 모델이 주로 연구 되었고 후에 Barge형 모델이 비교 연구 되어 왔으며 이는 Barge형 모델이

Spar-Buoy형 보다 해상에서의 새로운 외부 교란에 더욱 민감히 반응하여 제어가 쉽지 않았기 때문이다.⁶⁾ 따라서 본 논문에서는 이점을 착안하여 정격 풍속에서 블레이드 피치 각 제어만으로 플랫폼의 안정성을 확보하기 위한 SIMO(단일입력 다중출력) 시스템의 제어를 설계하였다. NREL에서 제공하는 FAST 환경 내에서 전반적인 5MW Barge형 해상풍력시스템을 수학적으로 모델링하였으며 칼만 필터를 이용한 최적 비례-적분제어를 설계하고 비선형 시뮬레이션을 통해 IEC 표준 기준⁷⁾에 의거한 검증을 하였다.

2. 시스템 및 실험 환경 구성

NREL에서는 5MW 풍력 시스템에 대한 기준 모델을 제공함과 함께, 적용되는 제어를 소개한바 있다.³⁾ 모든 프로세스가 공용 소프트웨어인 FAST를 통해 이루어지기 때문에 이를 기반으로 시스템 및 실험 환경을 구성하였으며 IEC 기준을 토대로 시뮬레이션 조건을 설정하였다.

2.1 시뮬레이션 환경

2.1.1 시뮬레이션 조건

해상풍력시스템은 육상풍력시스템과는 달리 파랑에 대한 환경 조건을 고려해야 한다. 이에 국제 표준 기준인 IEC 61400-3⁷⁾의 내용을 참고하여 시뮬레이션 조건을 설정하였다. IEC 기준안에 따르면, DLC 1.2에서는 정상해상상태로 가정한다. 각 정상해상상태에 대해 유의 파고(Significant wave height), 피크 스펙트럼 주기(Peak spectral period) 및 방향을 예상 사이트에 적합한 해상기상 파라미터의 장기 결합 확률 분포를 기반으로 하여 해당 평균풍속과 함께 선택해야 한다. 본 논문에서는 이러한 기준안을 고려하여 시뮬레이션 조건을 설정하였으며 이를 다시 정리하면 Table 1, 2와 같다.⁶⁾ 제어 목적에 맞는 구간이 영역3으로 국한되기 때문에 영역3의 중앙 풍속인 18m/s를 기준 풍속으로 하였으며, 난류 강도는 IEC 기준 중 'B'급인 약 15%로 설정하였다.⁷⁾

또한 FAST와 Matlab/Simulink의 연동 시 시스템의 초기조건에 대한 설정이 제한적인 이유로 전체 시뮬레이션 630초 시간 중, 초기 조건의 영향력이 일정 줄어든 후의 시간인 300초에서 부터 600초 사이의 시뮬레이션 결과를 해

Table 1. Summary of DLC 1.2 condition

DLC	Wind condition	Waves	Wind and wave directionality	Sea currents
1.2	NTM	NSS	Co-directional and multi-directional	No currents

Table 2. Input condition of simulation

파라미터	Average wind speed [m/s]	Significant wave height [m]	Peak spectral period [s]
입력	18	3.25	9.7

석에 이용하였다.

2.2 해상풍력시스템

2.2.1 부유식 해상풍력시스템

본 연구의 대상 모델은 부유식 해상풍력시스템으로 Barge 형 모델이라 하며, 크게 동체 부분과 플랫폼 부분, 그리고 Mooring 라인 부분으로 나누어 해석할 수 있다. 다시 동체 부분은 블레이드와 허브, 나셀, 회전축, 타워로 나누어 볼 수 있으며, 이 부분을 기존의 NREL에서 제시한 5MW 풍력시스템 기본 모델로 한다. 그리고 플랫폼 부분은 ITI Barge 플랫폼을 모델로 한다. 또한 라인(Mooring)이 플랫폼을 고정시키기 위하여 부착되는데, Barge형 모델은 모서리마다 2개의 라인으로 총 8개의 라인이 구성된다. 각 라인 또한 모델화 되어 추가 해석되어지며, FAST의 버전이 7에서 8로 업그레이드됨에 따라 이에 대한 해석이 더욱 세분화되고 있는 추세이다. 하지만 본 논문에서는 FAST 버전 7의 환경에서 구성하여 실험하였기 때문에 라인에 대한 해석은 깊게 다루지 않았음을 밝힌다. 때문에 풍력 모델 자체에는 큰 변화 없이 기존의 5MW 모델 그대로 적용되지만, 플랫폼과 부착되는 타워 부분에 대한 데이터만 약간 수정되고 ITI Barge 플랫폼 모델이 추가 모듈화 되어 해석되어 진다. Table 3을 통해 개략적인 전체 모델에 대한 제원을 확인할 수 있다.

2.2.2 모델 선형화

제어기를 설계하기 위하여 주어진 비선형 시스템을 선형화 할 필요가 있다. 선형화 과정 또한 FAST를 통해 계산할 수 있으며, 수식 (1), (2), (3), (4)는 실제 FAST 소프트웨어 상에서 본 연구의 목적에 맞게 설계 변수를 지정한 것이다. 선형화 모델의 상태 변수(x)는 수식 (1)과 같이 지정

Table 3. NREL 5 MW turbine and Barge model parameters

Wind turbine	Power rating	5 MW
	Rotor orientation	Upwind
	Control	Variable speed, variable pitch, active yaw
	Rotor, hub diameter	126 m, 3 m
	Hub height	90 m
	Rated rotor, generator speed	12.1 rpm, 1173.7 rpm
	Blade operation	Pitch to feather
	Maximum blade pitch rate	8 deg/s
	Rated generator torque	43,093 Nm
Barge	Maximum generator torque	47,402 Nm
	Width	40 m
	Length	40 m
	Height	10 m
	Draft	4 m
Anchor depth	150 m	

하였는데, h 는 플랫폼의 상하 운동(Heave)이고 θ_r 은 플랫폼의 롤 운동(Roll)이며 θ_p 는 플랫폼의 피치 운동(Pitch), θ_y 는 플랫폼의 요 운동(Yaw), x_t 는 타워의 전후 방향 운동(forward-aft), y_t 는 타워의 좌우 방향 운동(side-side), $\dot{\psi}$ 는 로터 회전속도로 $\dot{\cdot}$ 은 각 변수의 단위 시간당 변화율을 의미한다. 선형화 모델의 제어 입력(u)은 통합 블레이드 피치각(β_c)으로 설계하였으며, 시뮬레이션에서의 가상 조건은 바람과 파랑 두 요소인 반면 제어기 설계를 위한 선형 모델에 대해서는 허브로의 수평 방향 바람(v)만을 외부 교란 입력(u_d)으로 설계하였다. 출력(y)는 플랫폼의 롤, 피치, 요 각속도와 로터 회전속도로 하였다.

$$x = \begin{bmatrix} h \\ \theta_r \\ \theta_p \\ \theta_y \\ x_t \\ y_t \\ \dot{h} \\ \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_p \\ \dot{\theta}_y \\ x_t \\ y_t \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{platform heave displacement} \\ \text{platform roll} \\ \text{platform pitch} \\ \text{platform yaw} \\ \text{tower fore - aft displacement} \\ \text{tower side - side displacement} \\ \text{platform heave velocity} \\ \text{platform roll rate} \\ \text{platform pitch rate} \\ \text{platform yaw rate} \\ \text{tower fore - aft velocity} \\ \text{tower side - side velocity} \\ \text{rotor speed} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$u = \beta_c = \text{collective blade pitch} \quad (2)$$

$$u_d = v = \text{horizontal wind speed} \quad (3)$$

$$y = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_p \\ \dot{\theta}_y \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{platform roll rate} \\ \text{platform pitch rate} \\ \text{platform yaw rate} \\ \text{rotor speed} \end{bmatrix} \quad (4)$$

구동기에 대한 모델은 따로 제시한 바가 없기에, 보통의 수식 (5), (6)로 근사화한 식을 적용하였고, 또한 구동기의 물리적 제한 범위를 아래의 수식 (7), (8)과 같이 적용하였다. 이는 일반적인 NREL 5MW 모델에 대한 제한 조건들과 동일하다.⁸⁾

$$\frac{\beta}{\beta^{cmd}} = \frac{1}{0.1s + 1} \quad (5)$$

$$\frac{T_g}{T_g^{cmd}} = \frac{1}{0.05s + 1} \quad (6)$$

$$0 \leq \beta \leq 90^\circ \quad (7)$$

$$0 \leq T_g \leq 47402.91 \text{ Nm} \quad (8)$$

3. 제어 알고리즘 설계

실제 제어기 설계에 앞서 일반적인 풍력 시스템의 제어 방식을 정리해보고자 한다. 우선, 앞서 설명한 대로 풍력 시스템의 제어 목적은 크게 최대 전력을 회수하는데 있다. 이를 위해서는 풍력 시스템이 추종해야 하는 작동점이 정

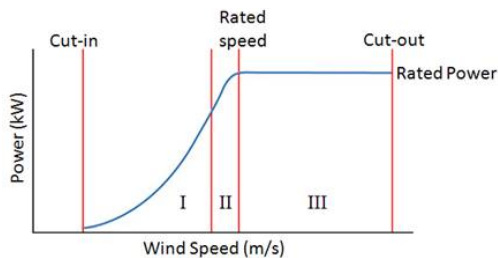


Fig. 1. Power curve⁹⁾

해져 있고, 이에 따라 영역별로 제어 방식이 달라진다. 일반적으로 크게 영역을 세 가지로 구분하여 최대 전력 계수 추종 구간(영역 1)과 천이 구간(영역 2) 그리고 최대 전력 유지 구간(영역 3)으로 본다. 따라서 이러한 풍력 시스템의 공력 특성에 따른 전반적인 제어 모드와 제어 영역을 Fig. 1로 나타낼 수 있으며 이를 파워 곡선이라 한다.

본 연구의 제어 목적은 첫째, 영역 3(11.4~25m/s)에 맞는 정격 파워를 유지하는 것과 둘째, 플랫폼의 안정성을 유지하는 것이다. 제어 목적을 달성하기 위하여, 최적 제어인 LQR 제어를 설계하고 칼만 필터를 통해 바람과 시스템의 상태변수를 추정하여 최종적으로 칼만 필터를 적용한 최적 비례-적분 제어를 설계하였다.

3.1 토크 제어기 설계

영역 3에 대한 블레이드 피치각 제어에 중점을 두기 위하여 토크 제어와 피치각 제어를 분리 설계하였다. 이에 블레이드 피치각 제어를 설계하기 전에 토크 제어를 먼저 설계하였는데 이는 수식 (9)와 같이, 발전기 파워의 변화를 0으로 하는 식을 적용하였고 이에 따른 토크 입력은 수식 (10)과 같다. 이렇게 하여 Fig. 2의 제어기 구조에서 토크 제어 부분을 우선적으로 설계하였다.

$$\Delta P_a = 0 \quad (9)$$

$$\Delta T_g = \left(1 - \frac{\Delta \Omega_g}{\Omega_g^*}\right) \cdot T_g^* \quad (10)$$

여기서 ΔP_a 는 발전기 파워의 변량이며, ΔT_g 는 발전기 토크의 변량, T_g^* 는 평형점에서의 발전기 토크, $\Delta \Omega_g$ 는 발전기 회전 속도, Ω_g^* 는 평형점에서의 발전기 회전 속도이다.

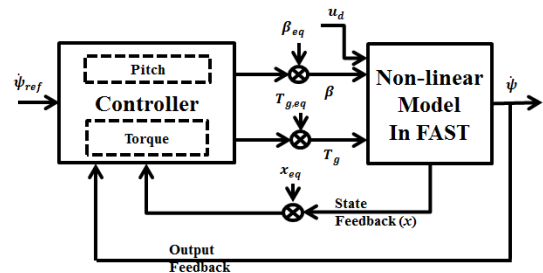


Fig. 2. Overall control structure

3.2 최적 비례-적분 제어기 설계

블레이드 피치 제어를 위하여 최적 제어인 LQR 기법을 적용하였다. 이는 선형 제어 기법 중 하나로 선형 상태 공간 방정식으로 표현되는 시스템 수식 (11)을 이용한다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (11)$$

그러나 앞서 지정한 시스템의 상태 변수(x)만으로는 로터 회전속도에 대한 성능을 높이는데 한계가 있었다. 이를 개선하고자 출력된 로터 회전속도를 e 로 하여 z_p 를 수식 (12)와 같이 정의하고 확장 상태 변수(augmented state)를 수식 (13)으로 정의하였다.

$$\begin{aligned} e &= y \\ \dot{z}_p &= e \end{aligned} \quad (12)$$

$$\tilde{x} = \begin{bmatrix} x \\ z_p \end{bmatrix} \quad (13)$$

\tilde{x} 에 대한 상태 공간 시스템 모델은 수식 (14)와 같고 최적 제어 기법을 적용하기 위한 비용 함수(J)는 수식 (15)와 같으며 이를 최소화 하는 것이 목적이다.

$$\dot{\tilde{x}} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (14)$$

$$J = \int (\tilde{x}^T Q \tilde{x} + u^T R u) dt \quad (15)$$

시스템의 확장 상태 변수인 \tilde{x} 에 따라 \tilde{A} , \tilde{B} , \tilde{K} 가 각각 확장 행렬로 정의되며 Q , R 은 가중 행렬로써 설계 변수로 다음의 조건인 수식 (16)을 만족하여야 한다.

$$Q = Q^T \geq 0, \quad R = R^T > 0 \quad (16)$$

비용 함수를 최소화 시키는 제어 법칙은 수식 (17)과 같이 확장 상태 변수를 위한 적분 제어기가 추가 설계 된다.

$$\begin{aligned} u &= -\tilde{K}\tilde{x} = -Kx - K_I z_p \\ &= -Kx - K_I \int e dt \end{aligned} \quad (17)$$

위와 같이 설계된 LQRI 제어기의 이득 \tilde{K} 를 수식 (18)에 의해 정의 한다.

$$\tilde{K} = [K \ K_I] = R^{-1} \tilde{B}^T P \quad (18)$$

여기서 P 는 수식 (19)와 같은 대수 방정식(ARE)의 풀이로부터 정의 된다.

$$0 = \tilde{A}^T P + P \tilde{A} - P \tilde{B} R^{-1} \tilde{B}^T P + Q \quad (19)$$

최종적인 LQRI 제어의 구조는 아래 Fig. 3과 같다.

아래 Fig. 4에서 18m/s의 펄스 바람 입력(v [m/s])에 대해 기준 제어기(Baseline)와 설계한 제어기(LQRI)를 비교

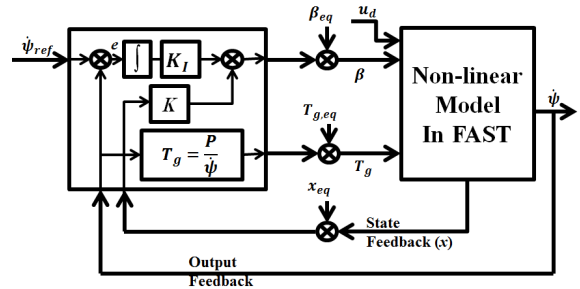


Fig. 3. LQRI controller structure

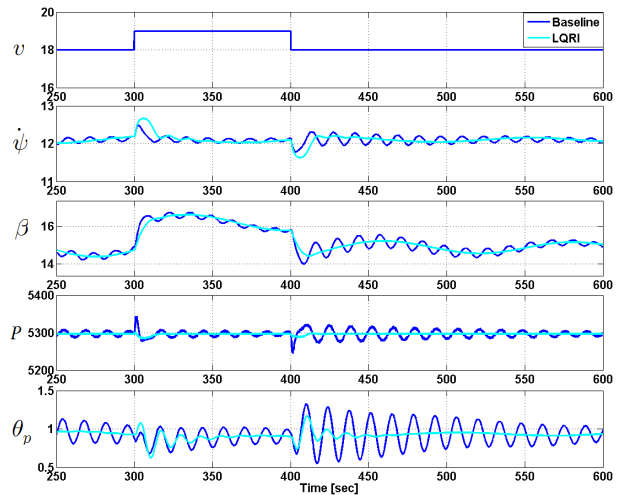


Fig. 4. System response 1

하였다. 초기 조건의 영향력이 줄어든 시뮬레이션의 후반 대 시간에 대하여 로터 회전속도($\dot{\psi}$ [rpm]), 블레이드 피치각(β [deg]), 출력 파워(P [kW]), 플랫폼 피치각(θ_p [deg])을 나타내고 있으며 파랑이 없는 조건에서 확인하였다. 전체적으로 입력에 대한 모든 응답들이 LQRI 제어가 기준 제어기와 비교하여 과도 상태에서 정상 상태로 더 빠르게 전환되는 것을 확인할 수 있다. 특히, LQRI제어기가 모든 응답들의 정착 시간(t_s)은 더 빠르지만 상승 시간(t_r)과 마루 시간(t_p)은 더 느리다. 또한 LQRI제어기가 로터 회전속도를 제외한 모든 응답들에 대하여 최대 초과(M_p)가 더 작았다.

3.3 칼만 필터 설계

최소의 센서를 선정하여 중요한 변수들을 간접적으로 추정할 수 있는 칼만 필터를 설계하여 바람 속도와 시스템의 상태변수를 추정하였다. 칼만 필터의 입력은 로터 회전속도와 플랫폼의 롤, 피치, 요 속도 값이 사용되었다. 상태 공간 시스템 모델과 바람의 수학적 모델은 수식 (18)과 같고 센서의 모델은 수식 (19)와 같으며 각각에 잡음으로 모델링하였다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + B_d d + w_x \\ \dot{d} &= w_d \end{aligned} \quad (18)$$

$$z = Hx + v \quad (19)$$

칼만 필터는 아래와 같은 수식 (20)으로 추정값을 계산한다. 즉 예측값과 현재 측정값($z(t)$)에 적절한 가중치($K_k(t)$)를 주고 더해서 추정값($\hat{x}_k(t)$)을 계산한다.

$$\hat{x}_k(t) = A_k \hat{x}_k(t) + B_k u(t) + K_k(t)[z(t) - H \hat{x}_k(t)] \quad (20)$$

칼만 필터에서 다루는 잡음은 수식 (21)과 같이 표준 정규분포를 따르는 백색잡음이다.

$$\begin{aligned} w(t) &\sim (0, Q_c) \\ v(t) &\sim (0, R_c) \end{aligned} \quad (21)$$

그런데 칼만 필터에서는 추정값을 계산하는 칼만게인(K_k)는 다음 수식으로 주어진다.

$$K_k = P_k H^T R_c^{-1} \quad (22)$$

여기서 P_k 는 수식 (23)과 같은 ARE의 유일해이다.

$$0 = A_k P_k + P_k A_k^T + Q_c - P_k H^T R_c^{-1} H P_k \quad (23)$$

최종적인 칼만 필터의 잡음 설정은 수식 (24)와 같다.

$$Q_c = \text{diag}(0.03^2, 0, 0, 0, 0.05^2, 0, 0, 0, 0.0005^2, 0, 0, 0.004^2, 0, 0.1) \quad (24)$$

$$R_c = \text{diag}(0.001^2, 0.003^2, 0.0008^2, 0.001^2)$$

상태 변수 피드백 값과 칼만 필터를 통해 도출된 추정 값을 비교한 그림은 아래 Fig. 5, 6, 7과 같다. 그림을 통해 바람과 파랑을 실제와 유사한 조건으로 설정하여 칼만 필터의 성능을 확인하였다.

Fig. 5는 입력으로 가한 풍속(v [m/s])과 파고(w_w [m])에 대한 풍속에 대한 추정 값의 차이(v_e [m/s])와 로터 회전속도에 대한 추정 값의 차이($\dot{\psi}_e$ [rad/s])를 보여준다. 추정 오차 평균이 0을 따라가는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 타워의 전후 방향의 변위에 대한 추정 값의 차

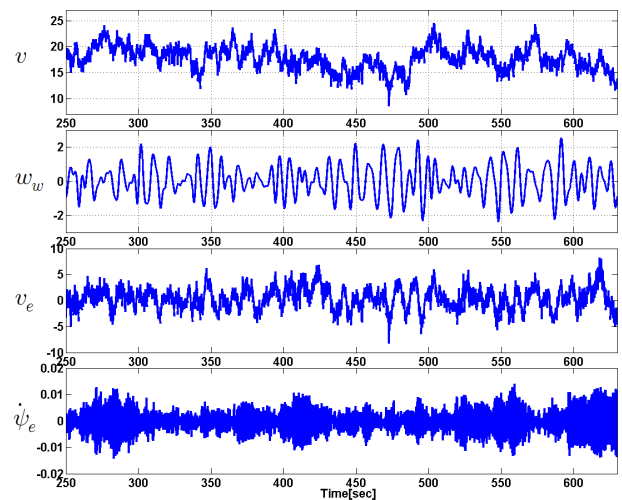


Fig. 5. Estimation error 1

이($x_{t,e}$ [m])와 타워의 좌우 방향의 변위에 대한 추정 값의 차이($y_{t,e}$ [m]), 플랫폼의 상하 변위에 대한 추정 값의 차이(h_e [m])와 플랫폼의 롤각 변화에 대한 추정 값의 차이($\theta_{r,e}$ [deg]), 플랫폼의 피치각 변화에 대한 추정 값의 차이($\theta_{p,e}$ [deg]) 그리고 플랫폼의 요각 변화에 대한 추정 값의 차이($\theta_{y,e}$ [deg])를 보여준다. 추정 오차 평균이 0을 따라가는 것을 확인할 수 있는데, 플랫폼의 요각 변화의 경우 유일하게 바이어스가 약간 생기는 것을 확인하였다.

Fig. 7은 타워의 전후 방향의 속도에 대한 추정 값의 차이($\dot{x}_{t,e}$ [m/s]) 그리고 타워의 좌우 방향의 속도에 대한 추정 값의 차이($\dot{y}_{t,e}$ [m/s])를 보여준다. 또한, 플랫폼의 상하

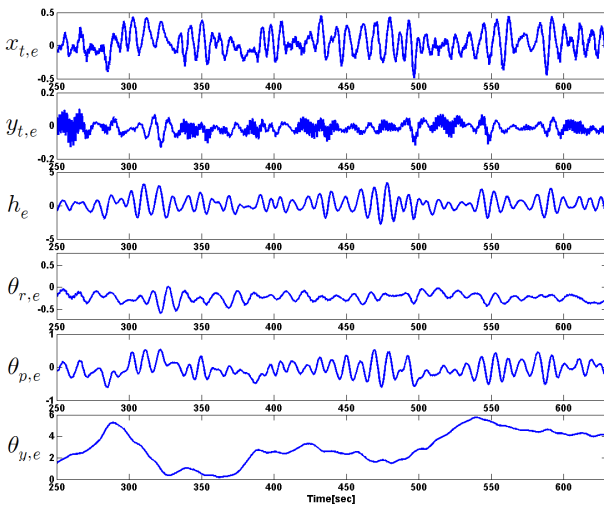


Fig. 6. Estimation error 2

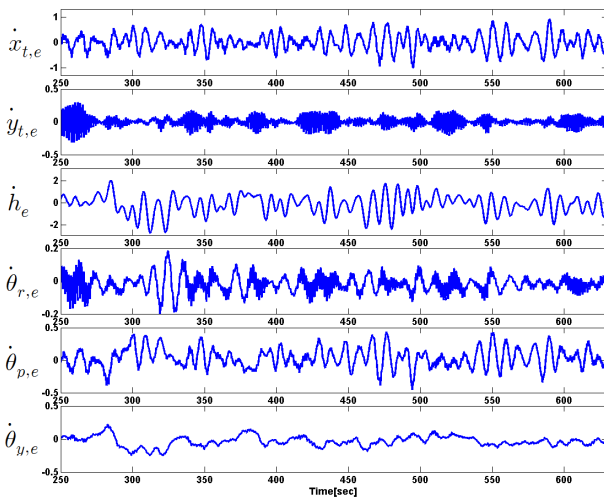


Fig. 7. Estimation error 3

속도에 대한 추정 값의 차이(\dot{h}_e [m/s])와 플랫폼의 롤각 속도에 대한 추정 값의 차이($\dot{\theta}_{r,e}$ [deg/s]), 플랫폼의 피치각 속도에 대한 추정 값의 차이($\dot{\theta}_{p,e}$ [deg/s]) 그리고 플랫폼의 요각 속도에 대한 추정 값의 차이($\dot{\theta}_{y,e}$ [deg/s])를 확인 할 수 있다. 추정 오차 평균이 0을 따라가는 것을 확인할 수 있으며 또한 플랫폼의 요각 변화와는 달리 요각 속도는 바이어스 없이 평균이 0을 따라가는 것을 확인할 수 있다.

위와 같이 칼만 필터의 추정 성능을 확인하고 최종적으로 이를 제어기와 결합한 구조는 Fig. 8과 같다.

4. 제어기 성능 평가

제어기의 성능은 제어 목적에 부합하도록 출력 파워[kW]와 로터 회전속도(ψ [rpm]), 블레이드 피치각(β [deg]) 그리고 플랫폼 피치각(θ_p [deg])과 플랫폼 피치각 속도($\dot{\theta}_p$ [deg/s])의 표준 편차를 통해 확인한다. 각각의 경우에 대하여 기준 제어기(Baseline)와의 비교 표준 편차를 백분율로 정리하였으며 음(-)의 부호는 표준 편차를 줄였음을 의미하고 이는 성능이 상대적으로 좋다는 것을 말한다. 특히 출력 파워와 플랫폼 피치각과 피치각 속도의 표준 편차가 작을수록 본 논문의 목적을 달성했음을 의미한다.

4.1 시뮬레이션 결과 비교

Fig. 9를 통해 전반적으로 정격 출력 파워 유지와 플랫폼의 안정화에 대한 성능 지표인 출력 파워, 로터 회전속도와 플랫폼 피치각, 피치각 속도에 대한 편차를 비교 대상인 기준 제어기에 비교하여 성능을 향상시켰음을 확인할 수 있다. 또한 블레이드 피치각의 편차를 통해서 는 구동기의

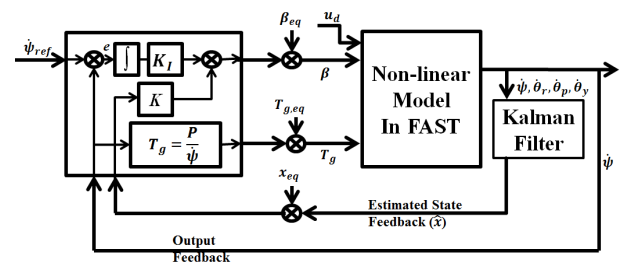


Fig. 8. LQR controller using kalman filter structure

부하를 줄일 수 있는 것을 확인하였고, 시뮬레이션 조건에서의 제어 목적 구간인 영역 3을 벗어나는 특이 부분만을 제외한다면 로터 회전속도에 대한 편차 또한 줄임으로 성능을 향상시켰음을 확인할 수 있다. 그리고 플랫폼의 피치각과 피치각 속도의 편차를 비교할 수 있는데 마찬가지로 기준 제어기에 비하여 설계된 제어기의 편차가 더 작음을 확인할 수 있다.

4.2 성능 지수 결과 비교

최종적으로 기준 제어기(Baseline)와 설계한 제어기(Proposed)와의 성능 비교를 Table 4에 표준편차를 통하여 기재하였다. 시뮬레이션 조건에 대한 성능 비교로, 출력 파워에 대하여 기준 제어기 보다 설계한 제어기가 65%의 표준 편차 감소를 보였음을 확인할 수 있다. 또한 플랫폼의 피치각의 표준 편차는 34% 감소하였다. 더불어 블레이드 피치각에 대한 표준 편차가 43% 이상 감소하였는데, 이는 피치 구동기의 운동을 감소시키는 효과로 볼 수 있다.

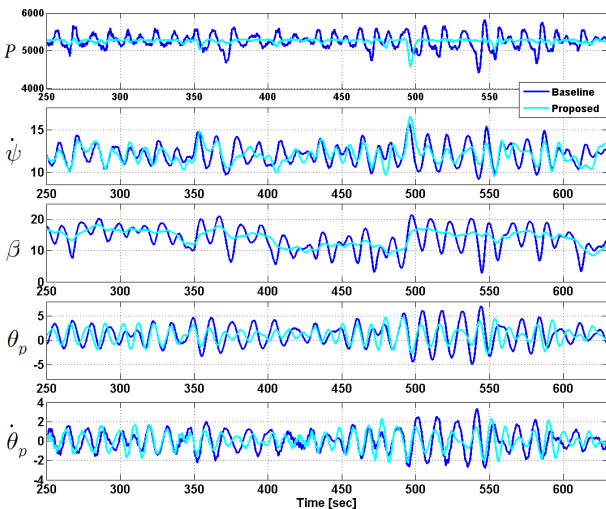


Fig. 9. System response 2

Table 4. STD result

제어기	P [kW]	ψ [rpm]	β [deg]	θ_p [deg]	$\dot{\theta}_p$ [deg/s]
Baseline	213.68	1.25	3.99	2.38	1.17
Proposed	74.77 (-65%)	1.03 (-18%)	2.25 (-44%)	1.57 (-34%)	0.9 (-22%)

5. 결론

본 연구를 통하여 우선적으로 풍력시스템 해석 소프트웨어인 FAST를 실험에 적용하여 풍력 시스템의 제어기를 설계하고 시뮬레이션 할 수 있는 환경을 구성하였다. 그리고 해상 풍력 시스템 중 Barge형 모델을 대상으로 하여 수학적 모델링을 하였다. 제어 시스템은 작동 영역 안에서 제어 목적에 맞는 제어 입력을 결정하는 방식으로 전 영역 중 영역 3에 대한 제어기를 설계하였다. 영역 3에서의 제어 목적은 정격 파워를 출력하는 것과 플랫폼의 피치 운동을 줄여 플랫폼을 안정하게 하는 것으로 이를 실현하기 위하여 통합 블레이드 피치 제어에 중점을 두었으며, 또 다른 제어 입력인 토크 값은 미리 분리하여 설계하였다. 블레이드 피치각 제어를 위해 LQR 제어 기법을 기반으로 하여 로터 회전속도를 확장 변수로 한 LQRI 제어기를 설계하였다. 또한 칼만 필터를 이용하여 바람 속도와 전 상태 변수들을 추정하였는데, 로터 회전속도와 플랫폼의 롤, 피치, 요 속도 값이 칼만 필터에 사용되었고 이를 통해 추정한 값을 제어기로 연결하여 최종적인 최적 비례-적분 제어기를 설계하였고, 기준 제어기와의 비교를 통하여 설계한 제어기의 성능을 확인하였다. 끝으로 현재의 제어 영역을 확장하여 전 영역에 대한 제어 기법을 개발할 필요성이 있으며 개별 블레이드 피치 제어를 적용하여 성능을 비교하는 것이 앞으로의 과제이다.

후 기

본 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 2011-0012420).

References

[1] Thure Traber, Claudia Kemfert, 2011, "Gone with the wind? - Electricity market prices and incentives to invest in thermal power plants underincreasing wind energy supply", Energy Economics. Kidlington Vol.

- 33, Iss. 2, pp. 249.
- [2] “풍력 발전”, <http://ko.wikipedia.org>
- [3] J. Jonkman, S.Butterfield, W. Musial, and G. Scott, 2007, “Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development”, National Renewable Energy Laboratory, TP-500-38060.
- [4] Jonkman, J. M., 2007, “Dynamics Modeling and Loads Analysis of an Offshore Floating Wind Turbine”, Ph.D. Thesis, Department of Aerospace Engineering Sciences, University of Colorado, Boulder.
- [5] Jason H. Laks, Lucy Y. Pao, and Alan D. Wright, 2009, “Control of Wind Turbines: Past, Present, and Future”, Proceedings of the American Control Conference, pp. 2096-2103
- [6] H. Namik, K. Stol, 2011, “Performance analysis of individual blade pitch control of offshore wind turbines on two floating platforms”, J. of Mechatronics
- [7] “Wind Turbines—Part 3: Design Requirements for Offshore Wind Turbines”, IEC Standard 61 400-3, 2009.
- [8] 남윤수, 2013, “풍력터빈 시스템 제어”, pp. 39, GS인터비전.
- [9] “Wind Turbine Control Methods”, <http://www.ni.com/white-paper/8189>