

두 대의 협력적인 발전기를 갖는 풍력발전기의 외란관측기 기반 제어기의 설계 및 검증

이국선* · 조항** · 백주훈* · 최익*

Design and Verification of Disturbance Observer based Controller for Windturbine with Two Cooperative Generators

Kook-Sun Lee* · Whang Cho** · Ju-Hoon Back* · Ick Choy*

요 약

본 논문은 외란관측기 개념을 이용하여 두 대의 협력적인 발전기를 갖는 풍력발전기의 발전 및 요잉 제어기 설계 방법을 제안한다. 협력형 풍력발전기란 날개축으로부터 공급된 풍력 에너지를 두 대의 발전기를 통하여 협력적으로 전기 에너지로 변환하는 차별화된 구조의 풍력발전기를 의미한다. 이 구조에서 두 대의 발전기는 독립적으로 제어가 가능하기 때문에 두 발전기의 발전부하를 적절하게 협력적으로 제어함으로써 발전과 동시에 추가적인 요잉 메커니즘 없이 너셀의 요잉제어가 가능하다. 이러한 구조적 특징을 이용하여 본 논문에서는 협력형 풍력발전기의 발전 및 요잉제어가 안정적으로 실행될 수 있도록 외란관측기를 기반으로 하는 제어기를 설계하고 이를 소형발전기 시스템에 적용하여 그 성능을 실험적으로 검증하였다.

ABSTRACT

This paper proposes a disturbance observer based controller design method for generating and yawing control of windturbine with two cooperative generators. Windturbine system with two cooperative generators is a distinct structure in which the wind energy supplied by blade axis is converted into electrical energy by two cooperative generators. In this structure, two generators can be controlled independently and therefore they can generate power, simultaneously performing yawing control of nacelle without extra yawing mechanism by cooperatively controlling generating load in appropriate manner. Using this structural trait, this paper designs a disturbance observer based controller that enables the windturbine system with cooperative generators to generate and yaw stably, and verifies the performance of the controller experimentally by applying it to a small-scale windturbine system with the same structure.

키워드

Disturbance Observer, Windturbine, Cooperative Generator
외란 관측기, 풍력 발전기, 협력형 발전기

* 광운대학교 로봇학부(ksl1222@gmail.com, backhoon@kw.ac.kr, ickchoy@kw.ac.kr) · Received : Dec. 22, 2016, Revised : Apr. 13, 2017, Accepted : Apr. 24, 2017

** 교신저자 : 광운대학교 로봇학부

· 접수일 : 2016. 12. 22

· 수정완료일 : 2017. 04. 13

· 게재확정일 : 2017. 04. 24

· Corresponding Author : Whang Cho
Division of Robotics(Information Control, Intelligence System), Kwangwoon University,
Email : robot@kw.ac.kr

1. 서론

저자는 선행연구들을 통해서 협력형 풍력발전기 구조를 제안하였다[1-2]. 기존의 방법들[3-6]에 비하여 제안된 협력형 풍력발전기의 장점은 다음과 같다.

첫째, 이 구조는 발전기가 너셀이 아닌 발전기 탑에 고정되기 때문에 발전된 전력을 지상으로 운반하는 것이 매우 용이하다. 발전기가 너셀에 고정된 일반적인 구조의 경우와 같이 송전선이 꼬이는 문제나 슬립링을 사용하는 문제가 해결된다. 둘째로 너셀을 바람의 방향을 따라 요잉하기 위해 추가적인 요잉장치(능동 요잉 메커니즘 제어장치 또는 꼬리날개)가 필요 없다. 협력형 풍력발전기 구조의 경우 두 발전기의 발전부하를 조절하면 너셀 요잉에 필요한 회전력을 발생시킬 수 있다. 대형 풍력발전기에 사용되는 능동 요잉 메커니즘이 매우 고가이고 잦은 고장의 원인이 됨을 고려할 때 본 시스템의 장점은 주목할 만 하다. 또한 꼬리날개에 의해 요잉이 제어되는 소형풍력발전기의 경우 돌풍상황에서 너셀의 요잉속도가 제어 안되는 상황이 발생할 수 있지만 이 경우도 협동형 발전기 구조는 요잉속도를 안정적 제어를 가능하게 한다. 셋째, 제안된 시스템에서는 날개 축으로 입력된 에너지가 두 개의 동력전달 경로를 따라 두 개의 발전기에 전달되는 구조이기 때문에 동력전달장치 용량을 단일 발전기 구조 경우보다 1/2로 줄일 수 있다.

반면, 선행 연구결과[1]에서는 협력형 풍력발전기의 구조의 특징을 설명하기 위해서 정상상태 거동만이 고려되었으며 롤축과 요축의 거동은 비-결합(decoupling)된 형태로 표현되었다. 또한, 시스템의 불확실성이나 외란의 영향에 대해서는 언급되지 않았다. 따라서, 실제 상황을 고려한 다양한 문제점들을 추가적으로 고려한다면 기 제안된 제어기만으로는 만족할 만한 성능을 기대할 수 없다.

본 논문에서는 기존 제어기의 단점을 보완할 수 있는 방법을 다음과 같이 제안한다. 먼저, 라그랑지(Lagrange) 방법을 이용하여 협력형 풍력발전기의 동역학을 유도한다. 이로부터 외란의 영향을 포함하는 시스템의 과도상태 뿐 아니라 발전축과 요축의 동역학이 기계적 마찰계수와 관성 모멘트에 의해서 상호-결합되어 있음을 확인할 수 있다. 다음으로, 위에서 언급된 문제점들을 해결하는 방법으로 외란관측기

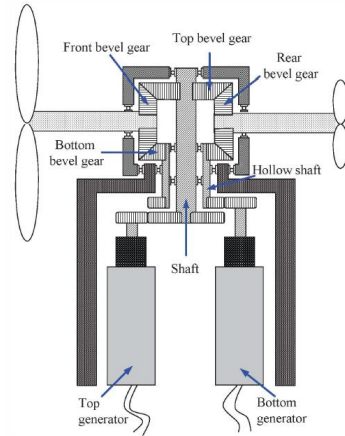


그림 1. 협력형 풍력발전기[1]

Fig. 1 Windturbine with cooperative generators

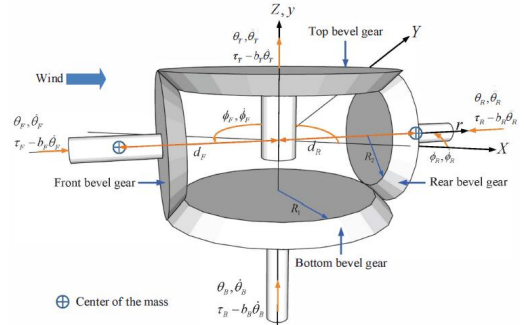


그림 2. 베벨기어의 구조[2]

Fig. 2 Structure of the bevel gears

(DOB) 기반 제어기를 제안한다. 외란관측기는 시스템의 불확실성과 외란에 대해서 강인한 성능을 갖고 있는 것으로 익히 알려져 있다[7-8]. 제안된 방법은 외란관측기를 롤축/요축에 각각 추가한 형태로서, 구현이 매우 용이하다. 마지막으로, 제안된 방법의 성능을 실험을 통하여 기존의 방법과 비교/검증한다.

II. 협력형 풍력발전기의 동역학 모델

그림 1은 협력형 풍력발전기의 구조이다[1]. 상단 베벨기어는 하단발전기, 하단 베벨기어는 상단발전기에 각각 연결되어 있다. 따라서, 블레이드만 회전하는 경우, 상단 발전기와 하단 발전기는 서로 반대 방향으로 회전한다. 반대로 너셀만 회전하는 경우, 상단 발

전기와 하단 발전기가 서로 같은 방향으로 회전한다. 시스템의 동역학을 유도하기 위해서 그림 2와 같이 너셀 내부를 자세히 표현하였다[2]. 그림 2에서 각 수식의 의미는 다음과 같다.

- X, Y, Z : 관성좌표계의 좌표축,
- r, y : 발전(rotating)축과 요(yaw)축,
- $\theta_T, \theta_B, \theta_F, \theta_R$: 각 베벨 기어의 회전각도,
- $\phi_F = \phi_R + 180^\circ$: 너셀의 회전각도,
- τ_T, τ_B : 각 발전기들의 전기적 토크,
- τ_F, τ_R : 바람에 의해서 발생하는 기계적 토크,

또한, 기어비 $\rho := R_1/R_2$ 를 이용하여 각속도-토크 관계식을 계산하면 다음의 식 (1)에서 식 (2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_y \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} \dot{\theta}_F \\ \dot{\phi}_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_R \\ \dot{\phi}_R \end{bmatrix} = T_\omega \begin{bmatrix} \dot{\theta}_T \\ \dot{\theta}_B \end{bmatrix}, T_\omega = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\rho & \frac{-1}{2}\rho \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_y \end{bmatrix} = T_\tau \begin{bmatrix} \tau_T \\ \tau_B \end{bmatrix}, T_\tau = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ \rho & \rho \end{bmatrix} \quad (2)$$

이제, 협력형 풍력발전기의 동역학을 얻기 위한 라그랑지 방정식은 다음 식 (3)로 같이 계산한다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_k} = Q_k \quad (3)$$

식 (3)에서 일반화 좌표계(generalized coordinate)를 다음과 같이 정의하자 $q_k := [\theta_r, \theta_y]^T$, $\dot{q}_k := [\omega_r, \omega_y]^T$. 이로부터 식 (3)의 라그랑지안(Lagrangian) L 과 일반화 힘(generalized force) Q_k 는 각각 다음과 같이 계산한다.

$$L = \frac{1}{2}(J_{F,r} + J_{R,r})\omega_r^2 + \frac{1}{2}(J_{F,y} + J_{R,y})\omega_y^2 + \frac{1}{2}J_{T,y} \left(\frac{1}{\rho}\omega_r + \omega_y \right)^2 + \frac{1}{2}J_{B,y} \left(-\frac{1}{\rho}\omega_r + \omega_y \right)^2$$

$$Q_r = \tau_F + \tau_R + \frac{1}{\rho}(\tau_T - \tau_B) - b_{rr}\omega_r - b_{ry}\omega_y$$

$$Q_y = \tau_T + \tau_B - b_{ry}\omega_r - b_{yy}\omega_y$$

여기서, $(J_{F,y}, J_{F,r}), (J_{R,r}, J_{R,y}), J_{T,y}, J_{B,y}$ 는 각각 4개 베벨기어(Front, Rear, Top, Bottom)의 관성모멘트를 r, y 축에서 계산한 값이다. 식 (3)을 정리하여, 협력형 풍력발전기의 동역학은 아래와 같이 간략하게 다시 쓸 수 있다.

$$J \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_y \end{bmatrix} + B \begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_F + \tau_R + \tau_r \\ \tau_y \end{bmatrix} =: \begin{bmatrix} \tau_{rr} \\ \tau_{yy} \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서,

$$J_{rr} = J_{F,r} + J_{R,r} + \frac{J_{T,y} + J_{B,y}}{\rho^2},$$

$$J_{yy} = J_{F,y} + J_{R,y} + J_{T,y} + J_{B,y},$$

$$J_{ry} = J_{yr} = \frac{J_{T,y} - J_{B,y}}{\rho},$$

$$b_{rr} = b_F + b_R + \frac{b_T + b_B}{\rho^2}, b_{yy} = b_T + b_B,$$

$$b_{ry} = b_{yr} = \frac{b_T - b_B}{\rho}.$$

주목 1. 식 (4)로 표현되는 협력형 풍력발전기의 동역학 모델은 파라미터 $b_{ry} \neq 0$ 와 $J_{ry} \neq 0$ 로 인하여 상호-결합되어 있다. 선행 연구결과[1]는 실제 시스템의 동역학을 비-결합($J_{ry} = 0, b_{ry} = 0$)으로 가정하였음을 알 수 있다.

III. 외란관측기 기반 제어기

그림 3은 단일-입출력(SISO) 시스템에 적용되는 일반적인 외란관측기의 개념을 나타낸 블록 다이어그램이다. 그림 3에서 시스템의 불확실성과 외부 외란(external disturbance) d 의 영향을 포함하는 덩어리 외란(lumped disturbance) \hat{d} 을 추정하여 시스템 $P(s)$ 에 인가한 수식은 다음과 같다[7-8].

$$y = P(s)(u_r - \hat{d})$$

$$u_r = C(s)(r - y)$$

$$\hat{d} = Q(s)P_n^{-1}(s)y - Q(s)u$$

여기서, $r \in R$ 은 출력 $y \in R$ 가 추종해야할 지령값, $P_n(s)$ 는 실제 시스템 $P(s)$ 와 동일한 상대 차수(relative degree)를 갖는 공칭 모델이다. Q-필터 $Q(s)$ 는 전달함수 $Q(s)P_n^{-1}(s)$ 를 적합(proper)하게 만드는 저역통과필터 형태로 설계된다. 즉, 저주파수에서 $Q(s) \approx 1$ 임을 상기하여 다음과 같이 시스템의 전달함수를 쉽게 계산할 수 있다.

$$\frac{y}{u_r} = \frac{P(s)P_n(s)}{Q(s)(P(s) - P_n(s)) + P_n(s)} \approx P_n(s),$$

$$\frac{y}{d} = \frac{P(s)P_n(s)(1-Q(s))}{Q(s)(P(s)-P_n(s))+P_n(s)} \approx 0.$$

위 수식으로부터 실제 시스템이 공칭모델과 유사하게 거동함을 알 수 있다. 페루프 시스템의 거동 $y \approx P_n(s)u_r$ 에는 시스템 파라미터의 불확실성과 외부 외란의 영향이 제거된 사실을 주목하자.

그림 4는 제안하는 협력형 풍력발전기의 외란 관측기 기반 제어기의 블록다이어그램이다. 보이는 바와 같이 기본적인 구조는 그림 3과 동일하다. 다만, 협력형 풍력발전기의 제어는 상/하단 발전기 측에서 수행된다는 점을 주의한다[1-2]. 시스템(식 (4))의 입력과 출력력을 식 (1)과 식 (2)로부터 다음과 같이 정의하자.

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &:= [\tau_r, \tau_y]^T = T_\tau [\tau_T, \tau_B]^T \in R^2, \\ \mathbf{y} &:= [\omega_r, \omega_y]^T = T_\omega [\omega_T, \omega_B]^T \in R^2 \end{aligned} \quad (5)$$

또한, Q-필터와 공칭모델은 다음과 같이 설계하자.

$$\begin{aligned} Q(s) &= \text{diag}\left\{\frac{1}{\tau s + 1}, \frac{1}{\tau s + 1}\right\}, \\ P_n(s) &= \text{diag}\left\{\frac{1}{J_{rr}s + b_{rr}}, \frac{1}{J_{yy}s + b_{yy}}\right\} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, τ 는 외란 관측기의 설계 파라미터, $\overline{J_{rr}}, \overline{J_{yy}}, \overline{b_{rr}}, \overline{b_{yy}}$ 는 각각 실제 시스템의 공칭값이다. 식 (6)에서 $Q(s)P_n^{-1}(s)$ 는 유사 전달함수 행렬(proper transfer function matrix)이다. 식 (5)와 식 (6)로부터 상/하단 발전기에 토크는 다음과 같이 인가한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \mathbf{u}_r - \hat{\mathbf{d}}, \quad [\tau_T, \tau_B]^T = T_\tau^{-1} \mathbf{u} \\ \mathbf{u}_r &= C(s)(\mathbf{r} - \mathbf{y}) \\ \hat{\mathbf{d}} &= P_n^{-1}(s)Q(s)\mathbf{y} - Q(s)\mathbf{u} \\ &= P_n^{-1}(s)Q(s)T_\omega \begin{bmatrix} \omega_T \\ \omega_B \end{bmatrix} - Q(s)\mathbf{u} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, $\mathbf{r} = [\omega_r^*, \omega_y^*]^T \in R^2$ 은 출력 \mathbf{y} 가 추종해야 할 지령값이다. 이상으로 제안된 외란관측기 기반 제어기의 안정도는 외란관측기의 다중-입출력 확장에 대한

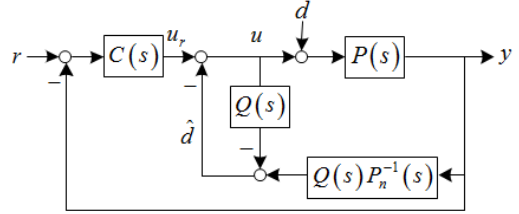


그림 3. 외란관측기의 구조[7-8]

Fig. 3 Block diagram of the disturbance observer

기존의 연구결과로부터 정리1로 보여진다[9-10].

정리 1. 식 (4)의 시스템과 식 (6)에서 식 (7)의 제안하는 제어가 각각 가정 1에서 가정 2를 만족하는 경우, 임의의 상수 $\tau^* > 0$ 가 존재하여 $0 < \tau < \tau^*$ 를 만족하는 모든 τ 에 대해서 전체 페루프 시스템이 안정하다.

가정 1. 바람으로부터 인가되는 기계적 토크 $\tau_w := \tau_F + \tau_R$ 와 그 미분값 $\dot{\tau}_w$ 의 크기는 유계(bounded)이다. 또한, 실제 시스템의 파라미터 J 와 B 의 불확실성의 크기도 제한되어 있다.

가정 2. 다음의 공칭 페루프 시스템이 지수적으로 안정하다.

$$\bar{\mathbf{y}} = P_n(s)\mathbf{u}_r = P_n(s)/(1 + P_n(s)C(s))\mathbf{r}$$

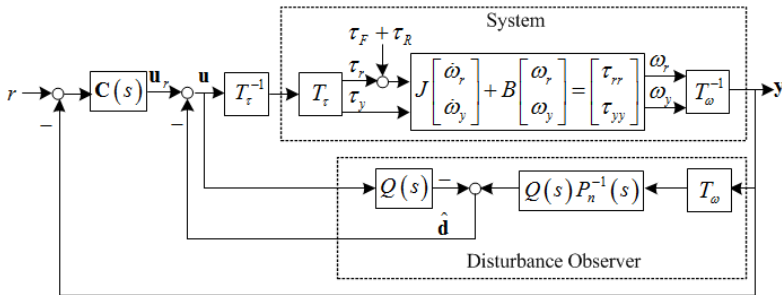


그림 4. 제안하는 방법 : 협력형 풍력발전기를 위한 외란관측기 기반 제어기

Fig. 4 Proposed method : Disturbance observer based controller for windturbine with two cooperative generators

가정 1은 자명하게 만족하며, 기 제안된 다음의 PI 제어기[1-2]는 가정 2를 만족한다.

$$\mathcal{C}(s) = \text{diag} \{K_{pr} + K_{ir}/s, K_{py} + K_{iy}/s\} \quad (8)$$

즉, 식 (4)에서 식 (8)로 설계되는 제안하는 외란관측기 기반 제어기는 정리 1에 의하여 폐루프 안정도가 보장된다.

마지막으로, 공칭 시스템 식 (6)이 비-결합된 형태임을 주목하자. 앞서 설명한 SISO-DOB에서와 동일한 원리로 실제 시스템이 공칭 시스템과 유사하게 거동한다면 실제 시스템의 결합($b_{ry} \neq 0, J_{ry} \neq 0$)에 의한 영향이 함께 보상된다.

IV. 실험 결과

본 장에서는 실험을 통하여 제안하는 외란 관측기 기반 제어기의 성능을 기존의 방법과 비교/검증 한다. 실험 데이터는 그림 5의 2[kW]급 협력형 풍력발전기 시뮬레이터를 이용하여 취득 하였다.

그림 6에서 그림 7의 실험결과는 롤축/요축 동역학의 상호-결합에 의한 영향을 나타내고 있다. 롤축의 각속도 지령 ω_r^* 은 20[rad/s]으로 일정하게 고정하고, 2초에서 요축의 각속도 ω_y 을 0[rad/s]에서 2[rad/s]으로 변경하였다. 보이는 바와 같이 기존의 제어기는 요축의 각속도 변화로 인한 롤축 각속도 ω_r 의 변동량이 약 11.38[rad/s] 이내이다. 반면, 제안하는 방법의 경우 약 3.31[rad/s] 이내로 개선되었다.

그림 8은 요각 θ_y 가 각각 2초, 7초, 그리고 15초에서 변동하는 경우의 실험 결과이다. 앞에서와 마찬가지로 제안하는 방법이 기존의 방법에 비해서 롤축 각속도의 변동량이 크게 개선되었다.

V. 결론

본 논문에서는 협력형 풍력발전기 구동을 위한 외란관측기 기반 제어기를 제안하였다. 발전기의 정상 상태 거동만을 고려하여 설계된 선행연구와 다르게 제안하는 방법은 발전기의 과도상태가 고려되었다. 2kW급 시뮬레이터를 이용한 실험 결과, 제안하는 방법을 통하여 롤축/요축 동역학의 상호-결합에 의한 영향이 효과적으로 보상됨을 확인하였다.

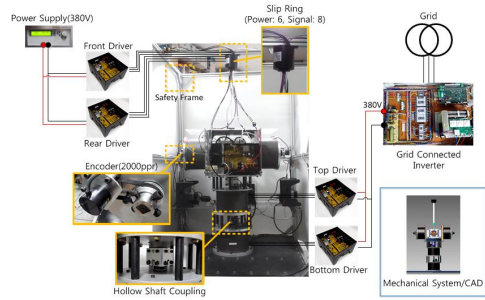


그림 5. 2kW급 협력형 발전기 시뮬레이터[2]
Fig. 5 2KW Simulator for the wind turbine with cooperative generators[2]

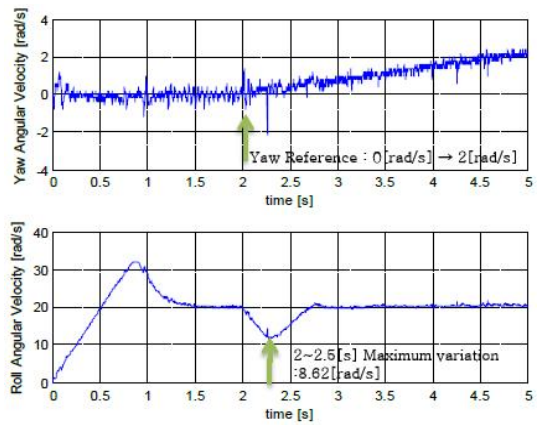


그림 6. 기존 제어기[1-2]의 응답
Fig. 6 Response of the previous method[1-2]

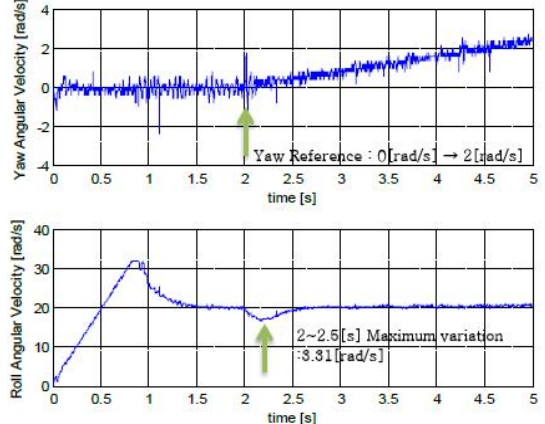


그림 7. 제안하는 외란관측기 기반 제어기의 응답
Fig. 7 Response of the proposed method

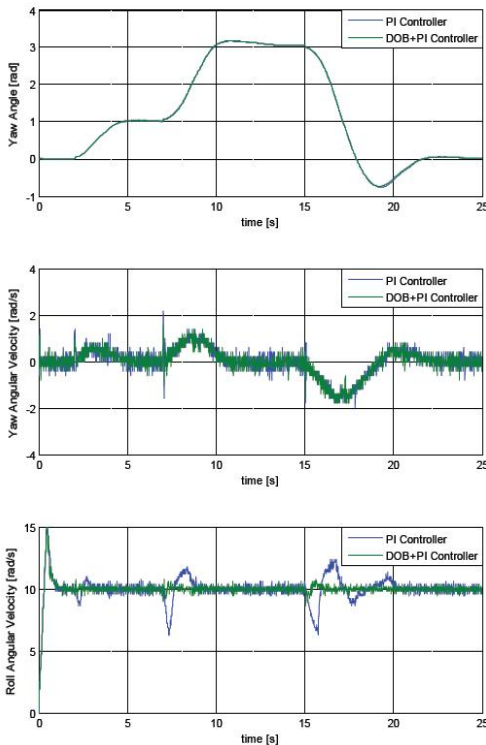


그림 8. 기존의 제어기와 제안하는 제어기의 비교 결과 : 요각 변화에 따른 롤축 각속도의 변동량 비교
 Fig. 8 Comparison of the performance : the variation of the rotating speed when the yaw angle is varied

감사의 글

본 논문은 2016년 광운대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행되었음

References

[1] K. Lee, I. Choy, W. Cho, and J. Back, "MPPT and Yawing Control of a New Horizontal-Axis Wind Turbine with Two Parallel-Connected Generators," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 7, no.1, 2012, pp. 81-89.
 [2] K. Lee, S. Kim, J. Back, I. Choy, and W. Cho, "Modelling and control of dual generator type wind turbine(DGWT)," *Int. Conf. on Control, Automation and Systems*, Clemson, USA, Oct. 2013, pp. 1830-1835.

[3] R. CMaydew and P. CKlimas, "Aerodynamic performance of vertical and horizontal axis wind turbines," *J. of Energy*, vol. 5, no.3, 1981, pp. 189-190.
 [4] M. Islam, D. Ting, and A. Fartaj, "Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 4, 2008, pp. 1087-1109.
 [5] F. Farret, L. Fischer, and D. Bernardon, "Active yaw control sensorless wind speed and direction measurements for horizontal axis wind turbines," *In Devices, Circuits and Systems, 3rd IEEE Int. Caracas Conf.*, Clemson, USA, Mar. 2000, pp. 1-6.
 [6] W. Cui, F. Yu, X. Liu, and J. Whitty, "Analysis of the passive yaw mechanism of small horizontal-axis wind turbines," *In World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy, IEEE Conf.*, San Diego, USA, Nov. 2009, pp. 1-5.
 [7] T. Umeno, T. Kaneko, and Y. Hori, "Robust servosystem design with two degrees of freedom and its application to novel motion control of robot manipulators," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 40, no. 5, 1993, pp. 473-485.
 [8] J. Back and H. Shim, "Adding robustness to nominal output-feedback controllers for uncertain nonlinear systems: a nonlinear version of disturbance observer," *Automatica*, vol. 44, no. 10, 2008, pp. 2528-2537.
 [9] Y. Joo, J. Back, H. Shim, and J. Seo, "Disturbance Observer of Multi-Input Multi-Output Linear Systems," *Proc. of the Korean Institute of Electrical Engineers Conf.*, San Antonio, USA, Oct. 2007, pp. 51-52.
 [10] J. Back and H. Shim, "An inner-loop controller guaranteeing robust transient performance for uncertain MIMO nonlinear systems," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 7, no. 2, 2009, pp. 1601-1607.

저자 소개



이국선(Kook-Sun Lee)

2009년 광운대학교 전자통신학과 졸업(공학사)

2011년 광운대학교 대학원 제어계측학과 졸업(공학석사)

2016년 광운대학교 제어계측학과 졸업(공학박사)

2017년 ~ 현재 서울과학기술대학교 전기정보 연구소 연수 연구원

※ 관심분야 : 전력 전자, 제어 시스템



최 익(Ick Choy)

1979년 서울대학교 전기공학과 졸업(공학사)

1981년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)

1990년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)

1982년 ~ 2003년 한국과학기술연구원 책임연구원

2003년 ~ 현재 광운대학교 로봇학부 교수

※ 관심분야 : 서보제어, 전력전자, 전동기제어



조 황(Whang Cho)

1981년 인하대학교 기계공학과 졸업(공학사)

1985년 텍사스 주립대(Austin) 대학원 기계공학과 졸업(공학석사)

1989년 텍사스 주립대(Austin) 대학원 기계공학과 졸업(공학박사)

1990년 ~ 현재 광운대학교 로봇학부 교수

※ 관심분야 : 지능로봇시스템, 무인비행체제어



백주훈(Ju-Hoon Back)

1997년 서울대학교 기계설계학과 졸업(공학사)

1999년 서울대학교 대학원 기계설계학과 졸업(공학석사)

2004년 서울대학교 대학원 전기공학부 졸업(공학박사)

2005년~2006년 영국 Imperial College, London, Research Associate

2007년~2008년 고려대학교 기계공학부 연구교수

2008년~현재 광운대학교 로봇학부 부교수

※ 관심분야 : 다개체 시스템, 풍력 발전 제어시스템, 비선형 제어

