

# 풍력 발전 계통의 자기 구조화 적응 퍼지 제어기 설계

## Adaptive self-structuring fuzzy controller of wind energy conversion systems

박장현

Jang-Hyun Park

목포대학교 제어로봇공학과

Dept. of Control and Robot Engineering, Mokpo National University

### 요 약

본 논문은 내재적으로 고도의 비선형 계통인 풍력 발전 계통 (wind energy conversion system, WECS)의 온라인(online) 적응 퍼지 제어기를 제안한다. 풍력 발전기를 실제 운전하기 위해서는 전력 계수 등과 같은 계통 파라미터를 사전에 측정해야 하며 다수의 센서들을 이용하여 풍동에서 실험이 수행되는데 많은 측정 장비와 수많은 실험이 요구되므로 어려움이 따른다. 이러한 단점을 극복하고자 본 논문에서는 제어기의 설계에 퍼지 논리 시스템(fuzzy logic system, FLS)을 도입한다. 제안된 적응 퍼지 제어기는 자기 구조화 알고리즘을 채택하여 제어 목적에 부합하는 FLS 파라미터들을 미리 결정할 필요 없이 자동으로 결정이 된다. 기존에 제안된 퍼지 제어 알고리즘에 비해서 본 논문은 자기 구조화 알고리즘을 채택하여 FLS의 구조 자체도 온라인으로 점차 수렴하게 된다. 또한 풍속의 미분을 추정하는 미분추정기를 도입하였으며 전체 폐루프 제어계의 리아프노프 안정도를 증명하였다.

**키워드** : 풍력 발전 계통, 적응 퍼지 제어, 자기구조화 퍼지 시스템

### Abstract

This paper proposes an online adaptive fuzzy controller for a wind energy conversion system (WECS) that is intrinsically highly nonlinear plant. In real application, to obtain exact system parameters such as power coefficient, many measuring instruments and off-line implementations are required, which is very difficult to perform. This shortcoming can be avoided by introducing fuzzy system in the controller design in this paper. The proposed adaptive fuzzy control scheme using self-structuring algorithm requires no system parameters to meet control objectives. Even the structure of the fuzzy system is automatically grows on-line, which distinguishes our proposed algorithm over the previously proposed fuzzy control schemes. Combining derivative estimator for wind velocity, the whole closed-loop system is shown to be stable in the sense of Lyapunov.

**Key Words** : Wind Energy Conversion System, Adaptive Fuzzy Control, Self-Structuring Fuzzy System

## 1. 서 론

대체 에너지인 신재생 에너지 중에서 풍력 발전 산업은 지속적으로 사용 가능한 무공해 천연 에너지원을 이용하는 산업으로써 산업의 결과물이 환경에 미치는 영향이 거의 없고, 국토가 비좁은 우리의 현실에서 제방이나 산간오지 등

을 개발할 수 있다는 특성을 가진다. 이러한 국토 이용 효율을 높일 수 있는 장점 때문에 우리나라에서 풍력 발전 설비의 도입이 점차 늘어가고 있다. 제어이론의 관점에서 보면 풍력발전계통(wind energy conversion system, WECS)는 비선형성과 불확실성이 매우 큰 계통이라 할 수 있다.[1,2] 이로 인해서 실제 계통의 운전을 위해서는 내재된 여러 매개변수 및 계수를 측정하는 별도의 실험을 거쳐야만 하며 실시간 운전시에도 풍속계 등 외부의 여러 센서에서 측정된 값들을 이용하여야 한다. 운전 목적은 주어진 풍속에 대응하는 최대 전력변환 효율을 유지하기 위해서 로터의 속도를 원하는 값으로 가변시키는 방식이 주를 이루며[3-6] 이를 최대 전력점 추종 (maximum power point tracking, MPPT)이라고 한다. 최대효율을 달성하는 동작점은 풍력 발전기 날개(blade)의 고유 특성치이고 풍동에서 행해지는 오프라인(off-line) 실험으로 얻어지는 측정값이다. 이러한 오프라인 실험과 실시간으로 요구되는 측정치를 얻기 위한 센서들의 필요를 줄이기 위해서 최근 WECS에 대한 강인 제어 및 지능제어 기법이 활발하게 연구되어지고 있다.[3-12, 17, 18] 이 중에서 퍼지논리시스템(fuzzy logic

접수일자: 2013년 1월 29일

심사(수정)일자: 2013년 3월 25일

게재확정일자 : 2013년 3월 26일

본 논문은 2010학년도 목포대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

system, FLS)을 이용한 제어기는 계통의 미지의 파라미터의 영향뿐만 아니라 구조적인 불확실성에도 대응할 수 있다. 특히 사전에 필요한 계통에 대한 정보 없이 점차로 학습해 나갈 수 있는 적응 퍼지 제어기는 풍력 발전 시스템을 비롯한 비선형 계통의 제어에 널리 적용되고 있다.[14, 15] 하지만 기존에 제안된 퍼지 제어 알고리즘들은[9-12, 17, 18] FLS의 구조뿐만 아니라 그 파라미터까지도 오프라인으로 미리 설정해야 한다. 이것은 제어대상 시스템 자체가 불확실성이 내재되어 있음에도 불구하고 제어기의 구조를 사전에 결정해야 한다는 큰 단점을 가진다. 또한 퍼지 제어기가 도입된 경우의 전체 WECS 제어계의 안정도에 대한 고찰은 아직 미미한 수준이다.

이러한 단점을 상쇄하기 위해서 본 논문에서는 WECS의 MPPT를 위해서 온라인으로 계통의 불확실성을 근사화하여 상쇄시키는 적응 제어 기법을 제안한다. 본 논문은 기존의 방법들과 달리 WECS의 계통 파라미터나 전력변환함수 등과 같은 요소를 미지의 요소로 간주하며 이에 대한 정보가 필요치 않다는 특징이 있다. 이를 위해 [14]에서 제안한 제어알고리즘을 적용하여 자기 구조화 FLS를 이용한 비선형 제어기 및 적용법칙을 제안하여 FLS 제어기의 파라미터뿐만 아니라 구조 자체도 사전에 미리 정할 필요 없이 온라인으로 자동으로 구성해 나가는 제어 알고리즘을 채택한다. 또한 본 논문에서는 제어기를 포함한 전체 폐루프 계통의 리아프노브(Lyapunov)안정도를 해석하였으며 모의실험을 통해서 그 성능을 증명하였다.

전체 제어계의 안정도 증명이 제시된 좀 더 최근의 연구 결과[17, 18]와 비교하여 제안된 제어 기법의 장점은 FLS의 구조까지도 온라인으로 학습된다는 점과 제어식을 계산하는 데 필요한 풍속의 가속도 값을 미분 추정기로 추정한다는 점이다.

## 2. 풍력 발전 시스템의 모델링

풍력 터빈에 의해 생성되는 기계적 전력은 식(1)과 같이 모델링할 수 있다[2].

$$P_t = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda) v_w^3(t) \quad (1)$$

이 수식에 쓰인 기호들의 의미는 표 1에 정리하였다. 이 중에서 말단속도비(tip speed ratio, TSR)  $\lambda$ 는 풍속과 블레이드 끝단의 선속도의 비율로서 다음 식 (2)와 같이 정의된다.

$$\lambda \triangleq \frac{v_t(t)}{v_w(t)} = \frac{\omega(t)R}{v_w(t)} \quad (2)$$

표 1. 수식에 쓰이는 기호들.

Table 1. Notations in the equations.

기호	의미
$\rho$	공기밀도
$C_p(\lambda)$	전력계수
$v_t$	날개 끝의 속도
$R$	날개의 반경
$A$	날개가 이루는 면적
$v_w$	풍속

$\omega$	발전기 축의 회전 속도
$\lambda$	말단 속도비 (tip-speed ratio, TSR)

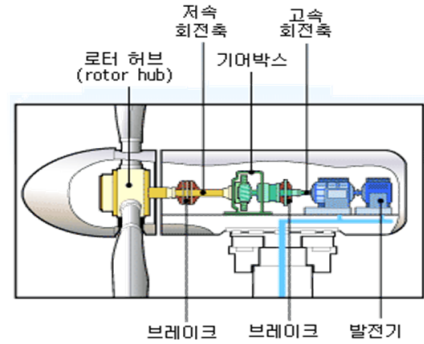


그림 1. WECS의 전체 블록 다이어그램.

Fig. 1. Block diagram of the wind generator

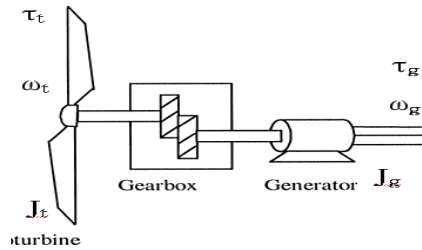


그림 2. 풍력 발전 시스템 파라미터 개념도

Fig. 2. Block diagram of the parameter concept

그림 1은 WECS의 전체 블록다이어그램이고, 그림 2와 그림 3은 식 (1)과 (2)에 나타난 파라미터를 이해하기 위한 개념도이다. 본 논문에서는 기어비는 1:1로 가정하며 풍력터빈의 관성계수와 발전기의 관성계수를 더하여  $J \triangleq J_t + J_g$  로 정의한다.

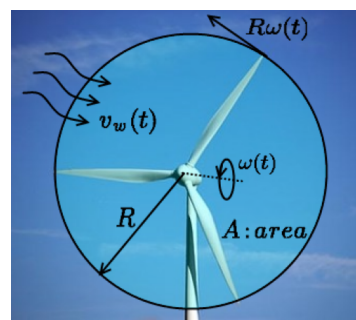


그림 3. 파라미터 이해도

Fig. 3. concept diagram of parameters

WECS의 동적 방정식을 기술할 때 중요한 요소인 전력 계수  $C_p(\lambda)$ 는 풍력터빈에 전달되는 풍력 에너지(바람의 운동에너지)와 실제 변환된 전력의 비율을 나타내는 함수로서 풍력터빈의 효율을 나타내는 지표이다. 그림 4는  $\lambda$ 와 블레이드의 피치각(pitch angle)  $\beta$ 의 함수인 전형적인  $C_p$ 곡선을 보여주고 있으며 특정한 운전조건에서 최대 효율을 위

한 최적값  $\lambda^*$ 가 존재함을 알 수 있다[2]. 풍력에 의해 발생 되는 토크는 식 (3)과 같이 기술할 수 있다.

$$\tau_t = \frac{P_t}{\omega(t)} \quad (3)$$

이러한 WECS의 모델식을 유도하기 위하여 본 논문에서는 두 가지 가정을 한다. 첫 번째는 풍력 발전기 회전체의 마찰력과 비틀림은 무시한다. 두 번째는 전기적인 시정수가 기계적인 시정수보다 충분히 빠르다는 것이다. 이러한 가정은 계통의 모델식의 차수를 줄여 간략화하기 위해서 관련 문헌에서 흔히 채용되고 있다.[2] 이 가정들에 의해 WECS의 1차 모델식은 식 (4)와 같이 기술될 수 있다.

$$J\dot{\omega}(t) = \tau_t - \tau_g \quad (4)$$

여기서  $J$ 는 관성계수,  $\tau_g$ 는 발전기의 반작용 토크를 나타낸다. 여기서 함수  $\tau_t(\omega, v_w)$ 는 미지의 함수로 가정한다. 즉, 이것은  $\omega$ 와  $v_w$ 의 함수라는 것만 알 수 있으며 구체적으로  $C_p$  함수가 어떤 함수인지는 알 수 없다고 가정한다.

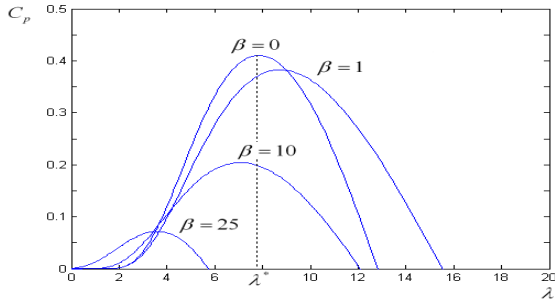


그림 4. 다양한 피치각  $\beta$ 에 대한  $C_p$  곡선의 예.

Fig. 4.  $C_p$ -curves with respect to pitch angle  $\beta$ .

### 3. 제어 알고리즘

#### 3.1 이상적인 비선형 입출력 선형화 제어기

앞 절에서 기술된 바와 같이 시스템의 모델링에서 발전기의 전기적인 시정수가 기계적 시정수와 비교했을 때 충분히 빠르다는 가정을 하면 시스템 제어 입력으로  $\tau_g$ 를 사용할 수 있으며 출력은 각속도  $\omega(t)$ 로 설정한다. 제어 목적은 최대 전력 변환 효율을 유지하기 위해서 말단속도비  $\lambda$ 가 최적치  $\lambda^*$ 를 유지해야 한다는 것이다. 이때 목표 출력  $\omega_d$ 는 측정된 풍속값과 말단속도비의 정의식 (2)로부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\omega_d(t) = \frac{\lambda^*}{R} v_w(t) \quad (5)$$

본 논문에서 WECS의 제어 목적은 제어 입력  $\tau_g$ 를 이용하여 각속도  $\omega(t)$ 가 원하는 축의 속도  $\omega_d(t)$ 를 추종하여 항상 최대 효율을 내도록 하는 것이다.

만약  $\tau_t$ 를 정확히 계산할 수 있고,  $\dot{\omega}_d(t)$ 을 정확히 측정할 수 있다고 가정하면 제어 목적을 수행하기 위한 입출력 선형화 제어 방법으로 다음 식 (6)과 같이 이상적인 제어 입력을 결정할 수 있다.

$$\tau_g = \tau_t + J(-ce - \dot{\omega}_d(t)) \quad (6)$$

여기서,  $c(>0)$ 은 설계 상수이고  $e(\triangleq \omega_d - \omega)$ 는 추종오차이다. 식 (4)의  $\tau_g$ 를 이상적인 제어식 (6)으로 치환하면 다음과 같은 결과식을 얻을 수 있고 이로부터 추종오차  $e$ 는 지수적으로 감소한다는 것을 알 수 있다.

$$\dot{e} = -ce \quad (7)$$

하지만 실제로는 미지의 항들 때문에  $\tau_t$ 를 정확히 계산할 수 없으므로 제어입력 (6)은 이상적인 식이며, 미지의 함수인  $\tau_t$ 를 추정하여 상쇄시키기 위해서 다음절에서 소개하는 FLS을 도입한다.

#### 3.2 미분 추정기

앞서서 풍속의 미분값을 측정할 수 있다는 가정을 하였으나, 실제로 풍속의 미분치를 측정하기 위해서는 풍속을 측정하는 풍속센서 이외에 별도의 가속도센서를 설치해야 하는 어려움이 있다. 이러한 어려움을 회피하기 위해 미분 추정기[16]를 사용한다. 이를 위해서  $v_w$ 와  $\dot{v}_w$ 가 유계라고 가정하고 다음과 같은 다음의 선형 시스템을 고려한다.

$$\begin{aligned} \epsilon \dot{\xi}_1 &= \xi_2 \\ \epsilon \dot{\xi}_2 &= -d_1 \xi_2 - \xi_1 + v_w(t) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서  $\epsilon(>0)$ 은 설계 상수이며,  $d_1$ 은 다항식  $s^2 + d_1s + 1$ 이 Hurwitz가 되도록 선정한다. 그러면, 어떤 양의 상수  $h$ 와  $t^*$ 에 대해서  $\forall t > t^*$ 를 만족하는 모든  $t$ 에 대해서 다음이 성립한다.

$$|\hat{z} - z| \leq \epsilon h \quad (9)$$

여기서  $z = [v_w, \dot{v}_w]^T$ 이고  $\hat{z} = [\xi_1, \xi_2/\epsilon]^T$ 이다. 이 사실은 [16]에 증명되어 있다. 만약 풍속의 미분을  $v_w^d(\triangleq dv_w/dt)$ 라고 표기하면 미분 추정기의 출력값 즉 풍속미분치의 추정치는  $\hat{v}_w^d = \xi_2/\epsilon$ 이다.

#### 3.3 퍼지 논리 시스템과 퍼지 기저 함수

고전적인 FLS는 퍼지화기, 퍼지 규칙, 퍼지 추론, 비퍼지화기의 네 구성 요소로 이루어진다. AFLS(adaptive FLS)는 FLS에 학습 능력을 추가한 것으로서 학습 정보를 이용하여 FLS의 특정 파라미터들을 튜닝(tuning)시키는 시스템이다. 그림 5는 AFLS를 도시하고 있다.

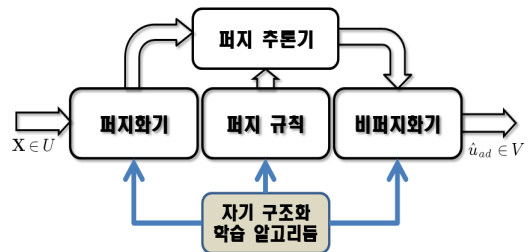


그림 5. 적응 퍼지 논리 시스템

Fig. 5. Adaptive fuzzy logic system

본 논문에서 고려하는 FLS는 다입력 단일출력 계통으로

서 다음과 같이 기술되는 총  $N = \prod_{j=1}^m N_j$  개의 퍼지 규칙을 가진다고 설정한다.

$$R_{i_1, i_2, \dots, i_m} : \text{IF } X_1 \text{ is } A_{i_1}^1 \text{ and } X_2 \text{ is } A_{i_2}^2 \dots \text{ and } X_m \text{ is } A_{i_m}^m \text{ THEN } \hat{u}_{ad} \text{ is } C_{i_1, i_2, \dots, i_m} \quad (10)$$

여기서  $i_1 = 1, 2, \dots, N_1$ ,  $i_2 = 1, 2, \dots, N_2$ , ...,  $i_m = 1, 2, \dots, N_m$  이고  $X_j, j = 1, \dots, m$  은 입력 변수,  $\hat{u}_{ad}$ 는 출력 변수, 그리고 퍼지 집합  $A_{i_j}^j \in U_j$  과  $C_{i_1, i_2, \dots, i_m} \in V$  은 퍼지 소속 함수  $A_{i_j}^j(X_j), C_{i_1, i_2, \dots, i_m}(\hat{u}_{ad})$ 로 기술되는 언어적 항들이다. 싱글톤 (singleton) 퍼지화기, 곱추론법(product inference), 무계중심 비퍼지화기를 사용한다면 FLS의 출력은 다음 식과 같이 기술된다.

$$\hat{u}_{ad}(X) = \frac{\sum_{i_1, i_2, \dots, i_m \in I} \left[ \frac{\prod_{j=1}^m A_{i_j}^j(X_j)}{\sum_{i_1, i_2, \dots, i_m \in I} \prod_{j=1}^m A_{i_j}^j(X_j)} \right] w_{i_1, i_2, \dots, i_m}}{\sum_{i_1, i_2, \dots, i_m \in I} \prod_{j=1}^m A_{i_j}^j(X_j)} \quad (11)$$

여기서  $A_{i_1, i_2, \dots, i_m}(X) = \prod_{j=1}^m A_{i_j}^j(X_j)$  이고  $w_{i_1, i_2, \dots, i_m} \in V$  은  $C_{i_1, \dots, i_m}$  이 최대값을 갖는 점이다. 일반적인 퍼지 집합의 정의에 의해서  $C_{i_1, \dots, i_m}(w_{i_1, i_2, \dots, i_m}) = 1$  이다. 식 (11)로부터 FLS는 퍼지 기저 함수 (fuzzy basis function, FBF)라고 불리는 다음 함수들의 선형 결합의 형태로 나타내진다는 것을 알 수 있다.

$$\phi_{i_1, \dots, i_m}(X) = \frac{A_{i_1, i_2, \dots, i_m}(X)}{\sum_{i_1, i_2, \dots, i_m \in I} \prod_{j=1}^m A_{i_j}^j(X_j)} \quad (12)$$

$i_j = 1, \dots, N_j, j = 1, \dots, m$

이 정의식을 이용하면 FLS의 출력식 (11)은 다음과 같이 기술된다.

$$\hat{u}_{ad}(X) = \sum_{i_1, i_2, \dots, i_m \in I} \phi_{i_1, \dots, i_m}(X) w_{i_1, \dots, i_m} = \mathbf{w}^T \Phi(X) \quad (13)$$

FLS의 학습 알고리즘을 기술하기 앞서서 퍼지 집합  $A_{i_j}^j(X_j)$ 에 대한 퍼지 소속 함수를 특정할 필요가 있다. 본 논문에서는 다음과 같이 기술되는 삼각형 소속 함수를 사용한다.

$$A_{i_j}^j(x_j; p_{i_j}, q_{i_j}) = \begin{cases} x_j - p_{i_j} + q_{i_j} & , p_{i_j} - q_{i_j} \leq x_j < p_{i_j} \\ -x_j + p_{i_j} + q_{i_j} & , p_{i_j} \leq x_j < p_{i_j} + q_{i_j} \\ 0 & , \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

여기서  $p_{i_j}$ 는 중심이고  $q_{i_j}$ 는 너비의 절반값이다.

### 3.4 자기 구조화 알고리즘

식 (13)으로 기술되는 FLS가  $R^m$  공간 전체에 대해서 근사화 기능을 가지려면 무한개의 소속 함수와 퍼지 규칙이 필요할 것이다. 그러나 만약 식 (14)와 같은 삼각형 소속함

수를 사용한다면 FLS가 무한개의 소속함수와 퍼지규칙을 가진다 해도 유한개 즉  $2^m$  개의 퍼지 규칙만이 0이 아닌 값을 가지게 된다. 이러한 점에 착안하여 [14]에서 FLS의 온라인 자기 구조화 알고리즘이 제안된 바 있으며 여기에 간략히 소개한다.

**1단계** : 초기에 주어진 입력값  $X_0 = [X_{01}, X_{02}, \dots, X_{0m}]^T$ 에 대해서 모든  $X_j, j = 1, \dots, m$ 에 대해서 각각 두 개의 소속 함수를 생성한다. (그림 6)

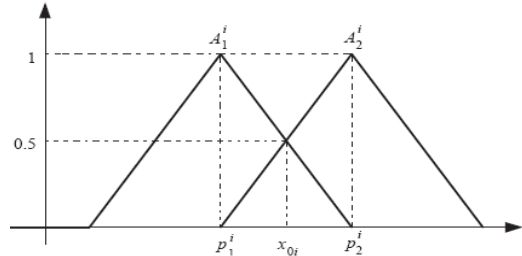


그림 6. 초기값  $X_0$ 에 의해 초기에 생성되는 소속 함수.

Fig. 6. Membership functions that are created by initial input vector  $X_0$ .

**2단계** : 1단계에서 생성된 퍼지 소속 함수를 이용하여  $2^m$  개의 퍼지 규칙을 생성한다.

$$\begin{aligned} R_{1,1,\dots,1} : & \text{IF } X_1 \text{ is } A_1^1 \text{ and } X_m \text{ is } A_1^m \text{ THEN } \hat{u}_{ad} \text{ is } C_{1,1,\dots,1} \\ R_{1,1,\dots,2} : & \text{IF } X_1 \text{ is } A_1^1 \text{ and } X_m \text{ is } A_2^m \text{ THEN } \hat{u}_{ad} \text{ is } C_{1,1,\dots,2} \\ & \vdots \\ R_{2,2,\dots,2} : & \text{IF } X_1 \text{ is } A_2^1 \text{ and } X_m \text{ is } A_2^m \text{ THEN } \hat{u}_{ad} \text{ is } C_{2,2,\dots,2} \end{aligned} \quad (15)$$

이렇게 구성된 FLS를 이용하여 제어가 시작된다.

**3단계** : 입력  $X_i$ 에 대한 가장 좌측의 소속 함수의 중심을  $p_L^i$ , 가장 우측의 소속 함수의 중심을  $p_R^i$ 이라고 하자. 제어가 수행되는 도중에  $X_i$ 가  $[p_L^i, p_R^i]$  범위를 벗어나면 그 순간에 새로운 소속 함수  $A_k^i$ 를 생성한다. (그림 7)

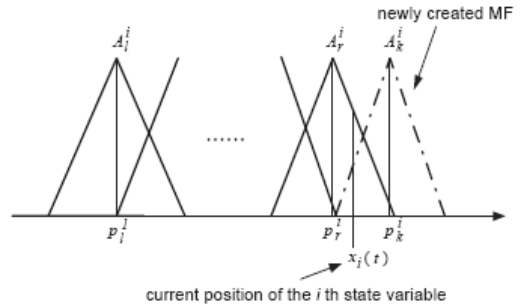


그림 7. 새로이 생성되는 소속 함수.

Fig. 7. Newly created membership function

**4단계** : 만약 3단계에서 새로운 소속 함수가 생성되었고 현재 입력  $X_j$ 에 대한 소속 함수가  $N_j$ 개라면  $(\prod_{j=1}^m N_j) / N_i$ 개의 새로운 퍼지 규칙을 생성해야 한다

$$\begin{aligned}
 R_{1,\dots,k,\dots,1} : & \text{IF } X_1 \text{ is } A_1^1 \cdots X_i \text{ is } A_k^i \cdots X_m \text{ is } A_1^m \\
 & \text{THEN } \hat{u}_{ad} \text{ is } C_{1,\dots,k,\dots,1} \\
 & \vdots \\
 R_{1,\dots,k,\dots,N_m} : & \text{IF } X_1 \text{ is } A_1^1 \cdots X_i \text{ is } A_k^i \cdots X_m \text{ is } A_{N_m}^m \\
 & \text{THEN } \hat{u}_{ad} \text{ is } C_{1,\dots,k,\dots,N_m} \\
 & \vdots \\
 R_{N_1,\dots,k,\dots,N_m} : & \text{IF } X_1 \text{ is } A_{N_1}^1 \cdots X_i \text{ is } A_k^i \cdots X_m \text{ is } A_{N_m}^m \\
 & \text{THEN } \hat{u}_{ad} \text{ is } C_{N_1,\dots,k,\dots,N_m}
 \end{aligned} \tag{16}$$

**5단계** : 3단계로 돌아가서 반복한다.

이 알고리즘을 사용하면 초기의 FLS는  $2^m$  개의 퍼지 규칙으로 시작하지만 입력 변수의 변화에 따라 점차로 소속 함수와 퍼지 규칙을 늘려가게 된다.

**정리 1** : (범용 근사화 이론)  $R^m$  공간에서 정의된 연속인 실함수  $u_{ad}^*(\eta)$  와 임의의 실수  $\epsilon_{re} > 0$  에 대해서 다음의 부등식을 만족하는 식 (13)과 같이 기술되는 FLS와 최적의 파라미터 벡터  $\mathbf{w}^*$  가 존재한다.

$$\sup_{\eta \in R^m} |u_{ad}^*(\eta) - \hat{u}_{ad}(\eta|\mathbf{w}^*)| < \epsilon_{re}. \tag{17}$$

정리 1에서  $\epsilon_{re}$  는 최적의 파라미터에 대해서도 구조적인 결핍으로 인해 불가피하게 내재하는 재구성 오차 (reconstruction error)를 나타내며 일반적으로 FLS의 소속 함수를 조밀하게 배치한다면  $\epsilon_{re}$  는 작아진다. 본 논문에서 이 후  $\mathbf{w}^*$  의 추정치를  $\hat{\mathbf{w}}$  로 표기한다.

### 3.5 제어기 설계 및 안정도 해석

풍속은 센서로 측정값을 얻을 수 있지만 그 미분  $v_w^d$  은 미지의 값이기 때문에  $\omega_d^d$  ( $\triangleq dw_d/dt$ ) 역시 미지이다.  $\omega_d^d$  를 추정하기 위해 미분추정기 (8)의 출력값  $\hat{v}_w^d$  과 (5)를 이용하면 다음과 같다.

$$\hat{\omega}_d^d(t) = \frac{\lambda^*}{R} \hat{v}_w^d \tag{18}$$

이제 이상적인 제어식 (6)에서 미지의 함수  $\tau_t$  와  $w_d^d$  를 추정치로 치환하여 기술하면 아래 식과 같다.

$$\tau_g = \hat{\tau}_t + J(-ce - \hat{\omega}_d^d) \tag{19}$$

퍼지시스템의 파라미터 갱신법칙은 다음과 같이 설정한다.

$$\dot{\hat{\mathbf{w}}} = -\frac{\gamma}{J} \Phi e \tag{20}$$

여기서  $\gamma (> 0)$  은 설계상수로서 학습율을 나타낸다.

시스템의 안정도를 해석하기 위해 리아프노브 함수 (Lyapunov function)를 아래와 같이 선정한다.

$$V(t) = \frac{1}{2} e^2 + \frac{1}{2\gamma} \tilde{\mathbf{w}}^T \tilde{\mathbf{w}} \tag{21}$$

여기서,  $\tilde{\mathbf{w}} \triangleq \hat{\mathbf{w}} - \mathbf{w}^*$  으로서 추정치와 최적치와의 오차를 나타낸다. 계통 추종오차의 미분식을 정리하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 \dot{e} &= \dot{\omega}_d - \dot{w} \\
 &= \dot{\omega}_d - \frac{1}{J}(\tau_t - \tau_g) \\
 &= \dot{\omega}_d - \frac{1}{J}(\tau_t - \hat{\tau}_t + J(ce + \hat{\omega}_d^d)) \\
 &= -ce - \frac{1}{J}(\tau_t - \hat{\tau}_t) + (\omega_d^d - \hat{\omega}_d^d) \\
 &= -ce + \frac{1}{J} \tilde{\mathbf{w}}^T \Phi + (\omega_d^d - \hat{\omega}_d^d)
 \end{aligned} \tag{22}$$

이제 (21)을 미분한 후 (22)와 (20)을 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \dot{V}(t) &= e(t)\dot{e}(t) + \frac{1}{\gamma} \tilde{\mathbf{w}}^T \dot{\tilde{\mathbf{w}}} \\
 &= -ce^2 + \tilde{\mathbf{w}}^T \left( \frac{1}{\gamma} \dot{\tilde{\mathbf{w}}} + \frac{1}{J} \Phi e \right) + e(\omega_d^d - \hat{\omega}_d^d) \\
 &= -ce^2 - e(\omega_d^d - \hat{\omega}_d^d) \\
 &\leq |e|(-ce|e| + \frac{\lambda^* \epsilon h}{R})
 \end{aligned} \tag{23}$$

마지막 부등식으로부터 추종오차  $e(t)$  는 아래와 같은 compact set에 대해서 invariant하다는 것을 알 수 있다.

$$\Omega = \left\{ e \mid |e| < \frac{\lambda^* \epsilon h}{cR} \right\} \tag{24}$$

또한  $\epsilon$  과  $c$  는 설계상수이므로 집합  $\Omega$  의 반경은  $c$  를 키우거나 혹은  $\epsilon$  을 줄여서 임의로 작게 만들 수 있으며 이것은 추종오차의 범위를 충분히 작게 조절할 수 있다는 것을 의미한다.

그림 8에 전체 제어계의 블록 다이어그램을 도시하였다.

## 4. 모의실험

본 장에서는 제안한 제어기의 성능을 보이기 위해서 모의실험을 수행하고 그 결과를 제시하였다. 모의실험에 사용된 파라미터는 아래 표 2와 같다. 풍속은 연속적으로 변한다고 가정했고 계통상수는 [2]의 예제 시스템에서 가져왔으며 제어기 상수는 몇 번의 모의실험을 거쳐서 확정하였다.

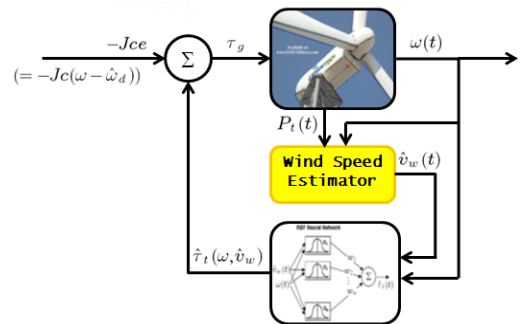


그림 8. 전체 제어 계통도

Fig. 8. Block diagram of the overall closed-loop system

표 2. 모의실험에 사용된 상수값.  
Table 2. Constants used in the simulation

기호	값	비고
$v_w$	$10\sin(t/10)+5$	풍속
$\rho$	1.2045	공기밀도상수
$R$	1.85	계통 상수
$J$	40	
$c$	1.0	제어기 상수
$\epsilon$	0.1	
$\gamma$	100	
$b_1$	2	

또한 모의실험을 위해서  $C_p(\lambda)$  를 식 (25)와 같이 설정하였다.[2] 가변속도 제어방식에서는 일반적으로 피치각은 고려하지 않으므로 본 논문에서도  $\beta=0$  으로 설정하였으며 그 모양은 그림 2에 도시된 바와 같다. TSR의 최적치는  $\lambda^* = 7.7$  이다.

$$C_p = 0.4654 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{20.24}{\lambda_i}} \quad (25)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.008\beta} - \frac{0.035}{\beta^2 + 1}$$

모의실험에 쓰인 FLS의 입력은 전술한 바와 같이  $\omega$ ,  $v_w$  두 개이며 각각에 대한 피지소속함수는 그림 9에 도시하였다. 그림 9에서 점선으로 표시된 것이 초기에 존재하는 함수이며 자기구조화 알고리즘에 의해서 초기 소속함수는 각각 두 개씩이다. 상태변수의 초기값은  $\omega(0) = 0$ ,  $v_w(0) = 0$  으로 설정하였으므로 초기 소속함수들도 이 초기값에 대해서 대칭적으로 배치되었다. 또한 그림 9에서 실선으로 표시된 것은 모의실험 중에 온라인으로 생성된 소속함수를 나타낸다.

최종적으로 로터각속도  $\omega$ 에 대한 소속함수는 4개, 풍속  $v_w$ 에 대한 소속함수는 5개로서 피지규칙의 개수는 초기에 4개에서 자동으로 다음과 같이 20개로 늘어났음을 알 수 있다.

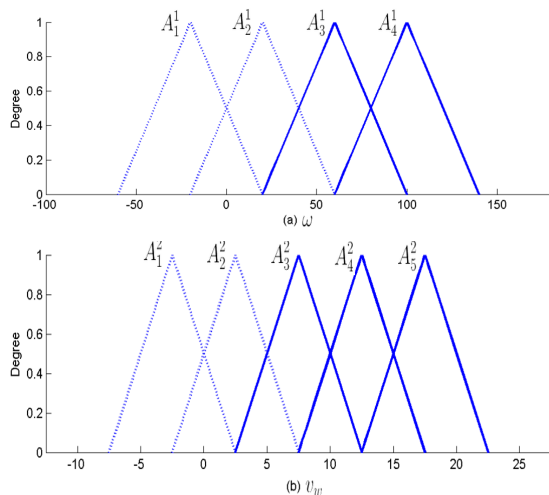


그림 9. (a) $\omega$ 의 소속함수, (b)  $v_w$ 의 소속함수.  
Fig. 9. (a) MFs of  $\omega$ , (b) MFs of  $v_w$ .

$R_{1,1}$ : IF  $\omega$  is  $A_1^1$  and  $v_w$  is  $A_1^2$  THEN  $\hat{u}_{ad}$  is  $C_{1,1}$   
 $R_{1,2}$ : IF  $\omega$  is  $A_1^1$  and  $v_w$  is  $A_2^2$  THEN  $\hat{u}_{ad}$  is  $C_{1,2}$   
 $\vdots$   
 $R_{2,1}$ : IF  $\omega$  is  $A_2^1$  and  $v_w$  is  $A_1^2$  THEN  $\hat{u}_{ad}$  is  $C_{2,1}$   
 $\vdots$   
 $R_{4,4}$ : IF  $\omega$  is  $A_4^1$  and  $v_w$  is  $A_4^2$  THEN  $\hat{u}_{ad}$  is  $C_{4,4}$   
 $R_{4,5}$ : IF  $\omega$  is  $A_4^1$  and  $v_w$  is  $A_5^2$  THEN  $\hat{u}_{ad}$  is  $C_{4,5}$

그림 10은 계통의 출력  $\omega$ 와 원하는 출력  $\omega_d$ , 그리고 제어입력  $\tau_g$ 를 도시한 것이다. 이로부터 계통의 출력이 원하는 출력을 잘 추종함을 알 수 있다. 그림 11는 FLS의 후건부 파라미터 벡터 노름(norm)의 시간에 따른 변화를 도시한 것이다. 이것으로부터 FLS 후건부 파라미터도 학습이 잘되며 발산하지 않음을 알 수 있다.

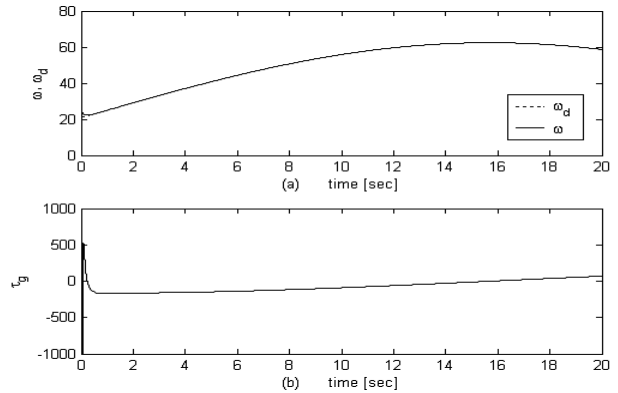


그림 10. (a) 계통출력, 원하는 출력 (b)제어입력.  
Fig. 10. (a) system output and desired output, (b) control input.

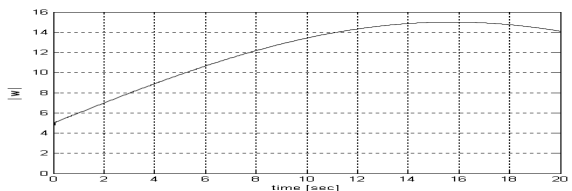


그림 11. FLS의 후건부 파라미터 노름(norm)의 변화.  
Fig. 11. Trajectory of the norm of the fuzzy parameters.

## 5. 결론

본 논문에서는 WECS가 최대 출력을 내기 위한 동작점으로 추종시키는 제어목적을 달성하기 위해서 적응 피지 제어를 제안하였다. WECS를 운전하기 위해서는 계통의 여러 상수들과 파라미터들을 얻기 위해 많은 측정 도구들을 이용하여 선행 실험을 수행해야하는데 이러한 과정을 줄이기 위한 새로운 제어 알고리즘을 제안하였다. 풍속의 미분값을 추정하기 위해서 미분 추정기를 페루프계통에 도입하였으며, 온라인으로 피지 제어기의 파라미터 및 구조를 학습시키며 제어를 수행하는 동적인 제어를 제안하였다. 전

체 페루프 시스템의 리아프노프 안정도를 해석하였으며 그 성능을 모의실험을 통하여 보였다.

## References

- [1] S. Heier, Grid integration of wind enery conversion systems, Wiley, New York, 1998.
- [2] Ph. Delarue, et. al., "Modelling, control and simulation of an overall wind energy conversion system," *Renewable Energy*, vol. 28 pp.1169-1185, 2003.
- [3] Y.D. Song, B. Dhinakaran, and X.Y. Bao,"Variable speed control of wind turbines using nonlinear and adaptive algorithms," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 85. pp293-308, 2000.
- [4] Andrew Miller, Edward Muljadi, and Donald S. Zinger. "A variable speed wind turbine power control," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 12, no. 2, 1997.
- [5] W. Qiao, et. al.,"Wind speed estimation based sensorless output maximum control for a wind turbine driving a DFIG," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 23, no. 3, 2008.
- [6] S. Bhomik R. Spec, and J. H. R. enslin, "Performance optimization for doubly fed wind power generation systems," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 35, no. 4, pp. 949-958, 1999.
- [7] W.-M. Lin, C.-M. Hong, and F.-S. Cheng, "Design of intelligent controllers for wind generation system with sensorless maximum wind energy control," *Energy Conversion and Management*, vol. 52, 2011.
- [8] H. Li, K. L. Shi, and P. G. McLaren, "Neural-network based sensorless maximum wind energy capture with compensated power coefficient," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, no. 6, pp. 1548-1556, 2005.
- [9] M. Pichan, and M. Monfared, "Fuzzy-based direct power control of doubly fed induction generator-based wind energy conversion systems," *Proceedings of 2nd International eConference on Computer and Knowledge Engineering*, pp. 66-70, Oct., 2012.
- [10] M. G. Simoes, B. K. Bose, and R. J. Spieget, "Fuzzy logic based intelligent control of a variable speed cage machine wind generation system," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 12, no. 1, pp. 87-95, 1997.
- [11] K. Mehrdad, A. Hossein, and K. Amir, "An enhanced MPPT fuzzy control of a wind turbine equipped with permanent magnet synchronous generator," *Proceedings of 2nd International eConference on Computer and Knowledge Engineering*, pp. 18-19, Oct., 2012.
- [12] P. Dewangan, and S. D. Bharti, "Grid connected doubly fed induction generator wind energy conversion system using fuzzy controller," *Int. J. Innovative Technology and Exploring Engineering*, vol. 2, no. 2, pp. 119-122, Jan., 2013.
- [13] J.-H. Park, S.-H. Kim, and C.-J. Moon, "Adaptive neural control for strict-feedback nonlinear systems without backstepping," *IEEE Trans., Neural Networks*, vol. 20, no. 7, pp. 1204-1209, 2009.
- [14] J-H Park, et. al., "State- and output-feedback adaptive controller for pure-feedback nonlinear systems using self-structuring fuzzy system," *Trans. KIEE*, vol. 61, no. 9, pp. 1319-1329, 2012.
- [15] C.-T. Lin, and C. S. G. Lee, *Neural fuzzy systems*, New Jersey : Prentice Hall, 1996.
- [16] S. Behatsh, "Robust output tracking for nonlinear systems," *Int. J. Control*, vol. 51, no. 6, pp. 1381-1407, 1990.
- [17] A. L. Elshafei, and M. A. Azzouz, "Adaptive fuzzy regulation of the DC-bus capacitor voltage in a wind energy conversion system (WECS)," *Experts Systems with Applications*, vol. 38, pp. 5500-5506, 2011.
- [18] D. Chen, S. Liu, and X. Ma, "Modeling, nonlinear dynamical analysis of a novel power system with random wind power and it's control," *Energy*, 2013, in press.

## 저 자 소 개



### 박장현(Jang-Hyun Park)

1995년 : 고려대학교 공학사 (전기공학과)  
 1997년 : 고려대학교 전기공학과 공학석사  
 2002년 : 고려대학교 전기공학과 공학박사  
 2003년~현재 : 목포대학교 제어로봇공학과  
 전임강사/조교수/부교수

관심분야 : 퍼지시스템, 신경망, 적응 제어, 비선형 제어, 마이크로콘트롤러 응용

Phone : +82-61-450-2755

E-mail : jhpark72@mokpo.ac.kr