뉴로-퍼지 제어기를 이용한 계통연계형 풍력발전 시스템의 센서리스 MPPT 제어

李顯熙*, 崔大根**, 李敎範[†]

Sensorless MPPT Control of a Grid-Connected Wind Power System Using a Neuro-Fuzzy Controller

Hyun-Hee Lee, Dae-Keun Choi, and Kyo-Beum Lee

요 약

본 논문은 뉴로-퍼지 제어기를 이용한 최적의 퍼지 소속함수에 동조하는 다층 신경회로망을 사용한 성능이 개선된 MPPT 알고리즘을 제안한다. 퍼지 제어기의 성능은 퍼지규칙과 퍼지 소속함수의 폭의 영향을 받는다. 뉴로-퍼지 제어기는 신경망 학습을 통해 퍼지 소속함수의 최적 폭을 이용하기 때문에 기존 퍼지 제어기보다 우수한 응답 특성을 갖는다. 실험과 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 알고리즘의 우수한 제어특성을 확인한다.

ABSTRACT

The MPPT algorithm using neuro-fuzzy controller is proposed to improve the performance of fuzzy controller in this paper. The width of membership function and fuzzy rule have an effect on the performance of fuzzy controller. The neuro-fuzzy controller has the response characteristic which is superior to the existing fuzzy controller, because of using the optimal width of the fuzzy membership function through the neural learning. The superior control characteristic of a proposed algorithm is confirmed through simulation and experiment results.

Key Words : Neuro-fuzzy, Sensorless MPPT, Grid connected inverter, Renewable energy, Boost converter

1. 서 론

최근 화석에너지의 고갈에 대한 대체에너지로 풍력 및 태양광 발전시스템이 각광을 받고 있다^[1]. 풍력발전 시스템의 경우 풍속변화에 대응 하여 최대 전력이 발

생되도록 하는 MPPT 제어가 요구된다.^[2] 즉, 풍속 가변 시 발전기 출력이 최대가 되게 하는 회전속도로 발전기를 동작시켜야 한다. 기존의 풍속과 회전속도의 정보를 이용하는 방법은 단순하지만 고가의 장비 및 측정 시 에러가 존재한다는 단점이 있다.^[3] 이러한 단점을 개선한 풍속과 회전속도의 정보를 필요로 하지 않는 센서리스 MPPT 제어 알고리즘이 필요하다.^{[4][5]} 센서리스 MPPT 제어는 발전기의 출력전력 및 출력전압의 관계를 비교하여 최대전력을 출력가능하게 할 수 있다. 센서리스 MPPT 제어 기법 중 P&O 알고리즘의 경우 추종속도가 느리고 정상상태인 최대 전력점 주위

[†]교신저자 : 정회원, 아주대 전자공학부 부교수

E-mail : kyl@ajou.ac.kr

*학생회원, 아주대 전자공학과 석사과정

**정회원, 아주대 전자공학과 박사과정

접수일자 : 2011. 8. 4 1차 심사 : 2011. 8. 26

2차 심사 : 2011. 9. 9 심사완료 : 2011. 9. 10

그림 1 계통연계형 풍력발전시스템
Fig. 1 Grid connected wind power system

에서 속도가 계속적으로 진동하는 문제가 있다.^[6] 이러한 단점을 개선하기 위해 퍼지 제어를 적용할 수 있다.^{[7][8]} 그러나 퍼지 제어기는 퍼지추론 방법, 비퍼지화 방법에 따라 퍼지 제어기의 소속함수 폭이 제어기의 응답 성능에 영향을 줄 수 있다. 그러므로 발전기 출력 및 회전속도 또는 출력전압에 대한 최적의 퍼지소속함수 폭을 필요로 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 신경회로망을 이용한 뉴로-퍼지 제어를 이용할 수 있다.^[9] 학습이 가능하고 정보의 분산처리 능력이 뛰어난 신경회로망을 이용하여 최적의 소속함수 폭을 결정하여 퍼지 제어를 개선할 수 있다.

본 논문에서는 최적의 소속함수 폭에 동조하는 뉴로-퍼지 제어를 이용한 MPPT 제어를 제안한다. 제안된 알고리즘은 시뮬레이션 및 유도전동기를 이용한 블레이드 시뮬레이터와 동기발전기, 승압형 컨버터, 인버터로 제작된 계통연계형 풍력발전시스템 실험세트를 이용한 실험을 통해 제안된 알고리즘의 타당성을 검증한다.

2. 풍력발전 시스템의 구성

시스템의 구성은 그림 1과 같다. 풍속이 유입되면 블레이드에서 발생한 기계적 에너지가 전기적 에너지로 변환되어 정류기, 승압형 컨버터, 인버터를 통해 단상 계통에 공급된다.

2.1 블레이드 특성

바람으로부터 블레이드에 들어오는 에너지는 식 (1)과 같다.

$$P_{wind} = \frac{1}{2} A \rho V_{wind}^3 C_p \quad (1)$$

A 는 블레이드 단면적 [m^2], ρ 는 공기밀도 약 $1.25 [kg/m^3]$, V_{wind} 는 풍속 [m/s], C_p 는 출력계수이다. 출력계수는 바람과 블레이드의 회전속도비인 주속비 λ 에 의해 결정된다. 식 (2)에서 R 은 블레이드 반경 [m]이다.

그림 2 주속비와 출력계수의 관계
Fig. 2 Power coefficient versus tip-speed ratio

$$\lambda = \frac{R \omega_{blade}}{V_{wind}} \quad (2)$$

그림 2는 주속비와 출력계수의 특성 곡선이다. 블레이드 회전속도가 증가하게 되면 출력계수가 증가하다가 어느 특정 회전속도보다 증가하게 되면 출력계수가 감소하게 된다. 이러한 출력계수는 블레이드의 설계에 따라 달라진다.

풍력발전시스템에서 최대 전력점 추종 알고리즘을 구현하기 위해선 풍속, 블레이드의 속도 및 출력특성 곡선이 요구된다. 블레이드 토크는 식 (3)과 같이 나타낸다. ω_m 는 블레이드 회전속도이다.

$$T_{wind} = \frac{P_{wind}}{\omega_{blade}} = \frac{1}{2} A \rho V_{wind}^3 \frac{C_p}{\omega_{blade}} \quad (3)$$

식 (4)는 블레이드와 발전기의 토크 관계식을 나타낸다.

$$T_{wind} = J_w \frac{d\omega_m}{dt} + T_{load} \quad (4)$$

J_w 는 블레이드 관성 모멘트이고 T_{load} 는 발전기 토크이다. 발전기토크와 발전기 부하단, 토크의 관계식은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{load} = J_g \frac{d\omega_m}{dt} + F_g \omega_m + T_g \quad (5)$$

F_g 는 발전기 마찰계수, J_g 는 발전기 관성모멘트, T_g 는 발전기 부하단 토크이다. 식 (4)와 식 (5)를 이용하여 풍력발전시스템의 전체 토크 관계식을 얻을 수 있다.

그림 3 발전기 회전속도와 터빈 출력과의 관계
Fig. 3 Turbine output power versus generator speed

그림 4 계통연계형 인버터 제어블록도
Fig. 4 Control block diagram of grid connected inverter

$$T_{wind} = (J_w + J_g) \frac{d\omega_m}{dt} + F_g \omega_m + T_g \quad (6)$$

식 (6)에 ω_m 을 곱해, 블레이드 출력특성 식을 다음 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{wind} = (J_w + J_g) \frac{d\omega_m}{dt} \omega_m + F_g \omega_m^2 + P_g \quad (7)$$

블레이드의 회전속도에 따른 출력특성은 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

2.2 직류단 전압 제어

인버터는 평균전력을 직류 측으로부터 교류 측으로

전달하는 전력변환기로 본 시스템에서는 직류단 전압을 제어하는 역할을 한다. 풍력발전시스템에서 발전된 전력이 계통으로 전달되기 위한 직류단 전압 제어 블록도는 그림 4와 같다.^[10] 직류단 전압의 지령 값과 실제 값의 오차가 IP 제어기의 입력이 되며, 그 출력인 지령전류와 실제전류와의 오차가 PI 전류제어기의 입력이 된다. 그 출력으로 지령전압이 생성된다.

2.3 승압형 컨버터

승압형 컨버터의 입력과 출력 전압 관계식은 다음 식 (8)과 같다.

$$V_o = \frac{1}{1-D} V_i \quad (8)$$

듀티비에 대한 미분 식으로 나타내면 식 (9)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dD}{dV_i} = -\frac{1}{V_o} < 0 \quad (9)$$

그림 3에서 발전기 최대 출력점에서 발전기 전력과 속도 관계는 식 (10)과 같다.

$$\frac{dP}{d\omega_m} = 0 \quad (10)$$

식 (10)에 연쇄법칙을 적용 하여 식 (11)을 유추할 수 있다.^[7]

$$\frac{dP}{d\omega_m} = \frac{dP}{dD} \cdot \frac{dD}{dV_i} \cdot \frac{dV_i}{d\omega_m} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{dV_i}{d\omega_m} > 0 \quad (12)$$

V_i 는 승압형 컨버터 입력전압이다 즉, 정류된 발전기 출력전압이다. 식 (11)에 식 (9)와 식 (12)를 대입하여 정리하면 식 (13)의 관계식을 구할 수 있다. 최종적으로 부스트 컨버터의 듀티비에 의해 최대 출력점 추종 제어가 가능하다는 것을 알 수 있다.

$$\frac{dP}{d\omega_m} = -\frac{dP}{dD} = 0 \quad (13)$$

그림 5에서는 승압형 컨버터의 듀티비 조절을 통해 발전기속도가 조절되어 최대전력을 추종하는 것

그림 5 최대 출력점 추종 과정
Fig. 5 MPP tracking process

명한다. 그림 5에서 전력이 증가하고 회전속도가 증가한다면 듀티비를 감소시켜주어 회전속도는 더욱 가속되어 발전전력이 최대 출력점에 도달할 수 있다. 또한 전력이 감소하고 회전속도가 증가하게 되는 경우엔 듀티비를 감소시켜줌으로써 회전속도는 감소되어 발전전력이 최대 전력점에 도달할 수 있다.^{[11][12]}

3. 최대 출력점 추종 알고리즘

본 논문에서는 앞서 설명한 최대 전력점 추종을 위해 인공신경망의 학습을 통하여 최적의 퍼지 소속함수 폭에 동조하는 뉴로-퍼지 제어를 이용한 MPPT 알고리즘을 제안한다.

3.1 퍼지 제어기

퍼지 제어는 전문가의 지식을 바탕으로 제어규칙을 언어적으로 쉽게 표현할 수 있으며, 외란에 대해 매우 강인한 특성을 가질 뿐만 아니라 제어대상을 수학적으로 정확히 근사화할 수 없는 경우에 제어대상의 입력과 출력관계 만으로 탁월한 성능을 발휘한다. 퍼지 제어기는 오차를 입력으로 이용하여 퍼지추론을 하며, 퍼지추론의 결과로 제어입력의 변화량을 출력으로 동작하게 된다.

본 논문에서는 발전기 회전속도의 정보 대신 승압형 컨버터의 입력전압의 변화량의 정보를 사용하였다. 발전기 속도는 발전기 출력전압과 비례하고 직류단 전압(승압형 컨버터 출력전압)은 고정되어 있기 때문이다. 최대 출력점 추종 제어를 위한 퍼지 제어기는 발전기 전력의 현재 값과 이전 값의 차이와 발전기의 정류된 전압 즉, 컨버터의 입력전압의 현재 값과 이전 값의

그림 6 본 논문에서 고려된 퍼지 제어기
Fig. 6 Considered fuzzy controller

그림 7 일반적인 퍼지 제어기의 전체 구성
Fig. 7 block diagram of general fuzzy logic controller

차를 입력으로 하여 전력이 증가하는 방향으로 승압형 컨버터의 새로운 입력전압을 만들기 위해 듀티비를 조절한다. 본 논문에서 고려된 퍼지 제어기의 블록도는 그림 6과 같다. 그림 7은 규칙에 근거한 추론 과정의 제어 블록도를 나타낸다. 퍼지제어기의 전체 구성도로 퍼지화기, 추론기, 비퍼지화기 세 개의 블록으로 구성된다.

3.2 퍼지화

퍼지화는 입력변수를 소속함수로 처리하는 과정이고 입력변수가 소속함수를 통해 관계되는 퍼지집합에 속하는 정도를 결정한다. 소속함수는 가우시안분포, 시그모이드곡선, 범종형, 삼각형 등의 임의의 형태일 수 있다. 일단 소속함수의 형태가 선택되면 중앙값과 변역을 선정한다. 어떠한 순간에 하나의 규칙이 만족되도록 소속함수가 중복이 되도록 한다.

본 논문에서는 소속함수를 삼각형으로 선택하였다. 그림 6에서 발전전력의 현재 값과 이전 값의 오차인 ΔP 는 7개, 승압형 컨버터 입력전압의 현재 값과 이전 값 ΔV_i 는 5개, 퍼지 제어기의 출력 ΔV_i^* 는 7개의 퍼지 집합을 갖도록 선정하였다. 그림 8은 입력 소속함수, 그림 9는 출력 소속함수를 나타낸다.

그림 8 입력 소속함수
Fig. 8 Input membership functions

그림 9 출력 소속함수
Fig. 9 Output membership function

퍼지추론은 퍼지논리 연산, 퍼지규칙, 회합 과정을 포함한다. 추론시스템에서 입력변수는 퍼지연산자와 IF-THEN 규칙을 직접 퍼지관계에 변형하여 출력 퍼지를 구한다. 각 규칙에 대해 출력퍼지 집합은 하나의 집합으로 회합되고 입력퍼지 집합은 논리연산자 AND에 의해 퍼지 규칙과 관계를 맺는다. 두 입력 퍼지집합에 대한 연산은 퍼지관계의 교집합이므로 식(14)와 같다.

$$\mu_{A \cap B} = \mu_A \wedge \mu_B = \min[\mu_A, \mu_B] \quad (14)$$

교집합연산 $\cap$ 은 최소치연산 $\wedge$ 에 의해 행하여진다.

표1의 최대출력추종 퍼지추론 규칙은 그림 5에서 도출하였고 입력 ΔP 와 ΔV_i 대해 출력인 ΔV_i^* 는 35개의 규칙을 갖는다. 퍼지 제어를 이용하기 위해선 비퍼지화의 과정이 필요하다 퍼지추론에 의해 결정된 ΔV_i^* 의 비퍼지화란 퍼지값을 실제수치로 바꾸주는 과정을 의미한다. 비퍼지화 방법은 수계노 제로-오더 방법을 사용한다.

3.3 퍼지 제어기 성능 변화

퍼지 제어기의 성능에 영향을 주는 주요 요인으로는 퍼지 규칙 퍼지추론방법, 비퍼지화방법이 있다. 이에

표 1 퍼지 제어기의 규칙

Table 1 Control rule of fuzzy controller

$\Delta P \backslash \Delta V_i$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PM	PS	Z	NS	NM	NB
NM	PM	PM	PS	Z	NS	NM	NM
Z	NM	NS	NS	Z	PS	PS	PM
PM	NM	NM	NS	Z	PS	PM	PM
PB	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB

그림 10 소속함수 폭의 크기에 따른 응답의 특성
Fig. 10 Characteristics of response by the width of membership functions

못지않게 퍼지 제어기의 제어성능에 중요한 요인이 되는 부분이 퍼지 소속함수의 폭이다. 실제로 적용하는 대부분의 퍼지 제어기는 소속함수의 폭을 제어대상에 따라 적절히 시행착오적으로 조정하여 사용하고 있다. 그림 10은 소속함수 폭의 크기를 조정함으로써 소속함수의 값이 달라지는 것을 예로 나타내었다.

그림 10의 (a)는 오차에 대한 소속함수의 폭이 1.5이고 오차가 0.8인 경우 소속함수의 값은 $\mu_{PM}(e)$, $\mu_{PS}(e)$ 가 되고 (b)는 오차에 대한 소속함수의 폭이 1이고 오차가 0.8인 경우 소속함수의 값은 $\mu_{PM}(e)$, $\mu_{PB}(e)$ 가 된다. 그러므로 소속함수 폭의 크기에 따라 퍼지추론 결과가 다르게 되므로 퍼지 제어기의 적합한 소속함수 폭을 찾아야 한다.

3.4 뉴로-퍼지 제어기

퍼지 제어기의 최적응답특성을 얻어내기 위해 인공신경망의 학습을 거쳐 출력된 값으로 최적의 폭을 결정한다. 인공신경망의 학습패턴은 입력패턴과 목적패턴으로 구성된다. 목적패턴은 신경회로망에 특정 입력을 인가했을 때 그 입력 값에 따라 출력 되어야하는 값을 의미 한다. 즉 목적패턴과 최종 출력 값을 비교하여 오차를 구하고 이를 기준으로 연결가중치의 조절량을 결정하게 된다. 이렇게 구해진 조절량만큼 가중

치를 조절하고 처음부터 다시 동작시킨다. 이 과정을 반복하면 에러는 적정 수준까지 떨어지게 되고 인공신경망은 퍼지제어기에서의 최적의 삼각함수 폭을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 목적패턴으로 절대 오차 시간 곱적분 (ITAE)을 사용하며 식 (15)로 정의 한다.

$$ITAE = \int |\Delta P(t)| dt \quad (15)$$

ΔP , ΔV_i 의 변화에 따른 응답특성이 가장 뛰어난 입력 소속함수 폭 $W_{\Delta P}$, $W_{\Delta V_i}$ 의 최적 값들을 찾아내기 위해 ITAE를 최소로 하는 값들을 학습데이터로 사용한다. 신경회로망은 그림 11과 같이 입력층 뉴런은 2개 은닉층 뉴런은 10개의 퍼지 제어기에 최적 소속함수폭을 공급하는 출력층 뉴런은 2개로 구성하였으며 학습율은 0.05이고 오류역전파 알고리즘을 사용하였다.^[13]

그림 11 본 논문에서 사용된 신경회로망 구조
Fig. 11 Structure of proposed Neural Network

그림 12 소속함수의 폭
(a) 기존의 퍼지제어기
(b) 풍속이 가변하는 경우
(c) 최대 출력점의 경우

Fig. 12 Width of membership function
(a) The existing fuzzy controller
(b) Case of the variation of wind speed
(c) Case of Maximum power point

뉴로-퍼지 제어기의 입력인 발전전력과 승압형 컨버터의 입력전압이 풍속변화에 의해 변화하기 때문에 소속함수의 폭이 그림 12와 같이 변화한다. 풍속이 가변되는 상황은 그림 12(b)처럼 소속함수의 폭이 기존의

그림 13 제안된 뉴로-퍼지 제어기 구조
Fig. 13 Proposed neuro-fuzzy controller

퍼지제어기인 그림 12(a)의 폭보다 좁아지며 퍼지제어기가 (PB)와 (NB)의 영향을 많이 받게 된다. 입력 변화가 크게 되므로 작은 오차에도 민감하게 반응하여 최대 출력점에 빠르게 도달한다. 최대 출력점에서는 그림 12(c)처럼 소속함수의 폭이 넓게 되고 퍼지 제어기의 입력 변화가 작게 되므로 정상상태에서 진동이 줄어들게 된다. 결국, 제안된 뉴로-퍼지 제어기는 소속함수의 폭이 신경회로망의 출력 값으로 최적의 값을 갖게 되어 보다 정확한 지령전압이 출력된다. 그림 13은 제안한 뉴로 퍼지 제어기를 나타낸다.

4. 시뮬레이션

제안된 알고리즘을 검증하기 위해 PSIM을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 승압형 컨버터의 인덕터는 6 [mH]이며, 커패시터는 2200 [uF]로 사용하였고 풍속은 8 [m/s]에서 11 [m/s]로 가변하였다. 블레이드의 최적출력계수는 0.475, 최적 주속비는 0.29531이다. 직류단 전압은 계통전압 첨두 값 311 [V]보다 약간 높은 350 [V]로 제어하였다. 그림 14는 MPPT 제어 시 기존 퍼지 제어기 입력부분의 소속함수폭인 $W_{\Delta P}$ 를 변화시킬 때의 시뮬레이션 파형이다. 그림 14(a)는 $W_{\Delta P}$ 가 0.2일 때, 그림 14(b)는 0.8일 때 그림 14(c)는 신경회로망 학습을 통해 소속함수의 폭이 변화되는 경우이다. 그림 14(a)는 소속함수 폭인 $W_{\Delta P}$ 가 좁아서 변수 (PB)의 영향을 받아 퍼지 제어기의 큰 입력 변화량으로 인해 출력에 진동이 나타난다. 그러므로 주속비가 최적 주속비 주위에서 진동하게 되어 풍속 11 [m/s]의 정상상태인 (3~4초)의 구간에서 발전전력이 진동하게 된다.

(a)

(b)

(c)

그림 14 최대 출력점 추종 제어

(a) $W_{\Delta P} = 0.2$

(b) $W_{\Delta P} = 0.8$

(c) 뉴로-퍼지 제어기

Fig. 14 The MPPT control

(a) $W_{\Delta P} = 0.2$

(b) $W_{\Delta P} = 0.8$

(c) The neuro-fuzzy controller

그림 14(b)는 $W_{\Delta P}$ 가 넓으므로 상대적으로 변수 (PS)의 영향을 많이 받아 퍼지제어기의 입력변화량이 작기 때문에 출력의 변화량이 작아져 풍속 11 [m/s]의 정상상태에서 최적 주속비가 아닌 2.7정도에서 고정되어 (3~4초)의 구간은 최대 전력이 아닌 1750 [W]가 출력된다. 그림 14(c)의 경우는 학습에 의해 최적의 소속함수 폭으로 변환되기 때문에 풍속 변화중이나 정상 상태에서 큰 진동 없이 최적 주속비가 유지되어 최대 출력 1791 [W]가 출력되는 것을 확인할 수 있다.

5. 실험

추종 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 시뮬레이션에서 동일한 조건의 실험세트를 이용한 실험을 수행하였다. 표 2에 전체 시스템 사양을 나타내었다. 그림 15는 제어부와 전력변환부를 나타내었다. 제어보드는 TMS320F028335를 사용하여 구성하였으며 전력변환부는 계통연계형 인버터 및 승압형 컨버터로 구성되어있다.

표 2 시스템 파라미터
Table 2 System parameter

파라미터	값
동기발전기 정격전력	3 [kW]
직류단 전압	350 [V]
승압형 컨버터 L	6 [mH]
직류단 C	2200 [uF]
LCL필터 L_1	4.5 [mH]
LCL필터 L_2	3.5 [mH]
LCL필터 C	10 [uF]
LCL필터 댐핑저항	5 [Ω]

그림 15 제어부 및
전력변환부

Fig. 15 Controller and
Power converter

그림 16 풍력발전기
Fig. 16 Wind generator

발전기 전력(W)

그림 17 풍속변화에 따른 발전기 출력

Fig. 17 Output power curves for different wind speeds

그림 16은 풍력발전기 블레이드 역할을 하기위해 유도전동기를 토크제어로 구동하며 3KW급 24극형 동기발전기의 축과 연결하였다. 그림 17은 회전속도에 대한 동기발전기의 출력전력 곡선이다. 회전속도를 바꿔가며 실제 출력 전력 데이터를 곡선으로 나타내었고, 특정한 속도에서 최대 출력이 발생한다.

(a)

(b)

그림 18 풍속이 변할 경우의 제어특성 (8↔11[m/s])

- (a) $W_{\Delta P} = 0.2$
 (b) $W_{\Delta P} = 0.8$
 (c) 뉴로-퍼지 제어기

Fig. 18 Control performance in case of the variation of wind speed (8 ↔ 11[m/s])

- (a) $W_{\Delta P} = 0.2$
 (b) $W_{\Delta P} = 0.8$
 (c) The neuro-fuzzy controller

그림 19 풍속이 연속적으로 변할 경우의 제어 특성 (7↔12[m/s])

Fig. 19 Control performance in case of continuous variation of wind speed (7 ↔ 12[m/s])

그림 18은 풍속을 8 [m/s]에서 11 [m/s]로 다시 8 [m/s]로 변할 경우의 제어특성을 보여준다. 그림 18 (a)와 (b)는 기존 퍼지제어기의 소속함수 폭이 $W_{\Delta P}$ 가 0.2와 0.8일 때이고, 그림 18(c)는 신경회로망 학습을 통해 소속함수의 폭이 변화되는 경우이다. 그림 18(a)는 그림 17과 비교하였을 때 최대 전력점을 추종하지만 시뮬레이션과 마찬가지로 소속함수 폭인 $W_{\Delta P}$ 가 좁아서 변수 (PB)의 영향을 받아 퍼지 제어기의 큰 입

력 변화량으로 인해 진동이 발생하게 된다. 그림 18 (b)는 $W_{\Delta P}$ 가 넓으므로 상대적으로 변수 (PS), (NS)의 영향을 많이 받아 퍼지 제어기의 입력변화량이 작기 때문에 출력의 변화량이 작아져 정상상태에서 최적 주속비가 아닌 2.6에서 2.8의 주속비를 확인할 수 있다. 그림 18(c)의 경우는 학습에 의해 최적의 소속함수 폭으로 변환되기 때문에 큰 진동 없이 그림 17과 같이 최대 출력점에서 발전기 최대 출력을 유지하고 있음을 확인할 수 있다. 그림 19와 같이 풍속이 7m/s에서 12m/s로 연속적으로 변화할 경우도 최적 주속비와 직류단 전압이 큰 진동 없이 유지하고 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 계통연계형 풍력발전기를 퍼지 제어를 개선한 뉴로-퍼지 제어를 사용하여 최대 출력점추종 알고리즘을 제안하고 시뮬레이션과 실험으로 그 우수성을 입증하였다. 발전전력과 승압형 컨버터 입력전압의 변화량에 따라 인공신경망을 이용하여 퍼지제어기의 소속함수의 폭을 가변함으로써 최대출력점추종 알고리즘의 성능 지표인 주속비의 응답특성을 개선하였다.

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(No.S2011A040300110).

참 고 문 헌

- [1] R. J. Wai, W. H. Wang, and C. Y. Lin, "High performance stand alone photovoltaic generation system", *IEEE Trans. on Ind Electron.*, Vol. 55, No. 1, pp. 240-250, 2008, Jan.
- [2] K. Park and K. B. Lee, "Hardware Simulator Development for a 3-Parallel Grid-connected PMSG Wind Power System", *Journal of Power Electronics*, Vol. 10, No. 5, pp. 555-562, 2010, Sept.
- [3] L. Hui and P. McLaren, and K.L. Shi, "Neural network based sensorless maximum wind energy capture with compensated power coefficient," *IEEE IAS Conf Rec.*, Vol. 4, pp. 2600-2608, 2004, October.
- [4] 장석호, 박홍극, 이동춘, 김홍근, "소형 풍력발전용 영구 자석형 동기발전기의 센서리스 제어", *전력전자학회 논문지*, 제14권, 제1호 pp. 15-22, 2009. 2.

- [5] M. Pucci and M. Cirrincione, "Neural MPPT Control of Wind Generators With Induction Machines Without Speed Sensors", *IEEE Trans. on Ind Electron.*, Vol. 58, pp. 37-47, 2011, Jan.
- [6] 지상근, 권두일, 유철희, 한상규, 노정옥, 이효범, 홍성수, "One Switching Cycle 내에 최대전력점을 추종하는 태양광 발전의 아날로그 MPPT 제어 시스템", *전력전자학회 논문지*, 제14권, 제2호, pp. 89-95, 2009. 4.
- [7] Q. N. Trinh and H. Lee, "Maximum Power Point Tracking in PMSG Using Fuzzy Logic Algorithm", *2009년도 추계학술대회 논문집*, pp. 135-138, 2009. 11.
- [8] 최영식, 유동영, 정진우, "퍼지제어를 이용한 영구자석 동기전동기의 강인한 속도제어", *전력전자학회 논문지*, 제15권, 제5호, pp. 343-351, 2010. 10.
- [9] S. Premrudeepreechacham and N. Patanapirom, "Solar-Array Modelling and Maximum Power Point Tracking Using Neural Networks", *IEEE Bologna Power Tech Conference*, 2003, June 23-26.
- [10] R. Bharanikumar, M. P. Maheswari and S. Palanichamy, "Boost chopper circuit for low power wind turbine driven pm synchronous generator", *IEEE Conferences*, pp. 859-863, 2007, Nov.
- [11] E. Koutroulis and K. Kalaitzakis, "Design of a Maximum Power Tracking System for Wind Energy Conversion Applications", *IEEE Trans on Ind Electron.*, Vol. 53, No. 2, pp. 486-494, 2006, April.
- [12] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo and M. Vitelli, "Optimizing sampling rate of P&O MPPT technique," *IEEE 35th Annual PESC*, pp. 1945-1949, 2004, June.
- [13] 이은실, 박기우, 이교범, "입력 전원 외란 상황에서의 신경회로망 기반 전류 보상기를 이용한 매트릭스 컨버터의 출력 전류 개선", *전력전자학회 논문지*, 제15권, 제3호, pp. 199-206, 2010. 6.

저 자 소 개

이현희(李顯熙)

1985년 3월 18일생. 2011년 수원대 전기공학과 졸업. 현재 아주대 전자공학과 석사과정.

최대근(崔大根)

1980년 3월 18일생. 2009년 아주대 전자공학부 졸업. 2011년 동 대학원 전자공학부 졸업(석사). 현재 동 대학원 전자공학과 박사과정.

이교범(李敎範)

1972년 6월 30일생. 1997년 아주대 공대 전자공학부 졸업. 1999년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2003년 고려대 전기공학과 졸업(공학박). 2003년~2006년 The Institute of Energy Technology, Aalborg University in Denmark. 2006년~2007년 전북대 전자정보공학부 조교수. 2007년~현재 아주대 전자공학부 부교수. 당 학회 JPE 편집위원.