

# PV 시스템의 고효율 태양 추적을 위한 퍼지제어기 개발

(Development of Fuzzy Controller for High Performance Solar tracking of PV System )

고재섭\* · 최정식 · 김도연 · 정병진 · 정동화

(Jae-Sub Ko · Jung-Sik Choi · Do-Yeon Kim · Byung-Jun Jung · Dong-Hwa Chung)

## Abstract

In this paper proposed the solar tracking system to use a fuzzy control order to increase an output of the PV(Photovoltaic) array. The solar tracking system operated two DC motors driving by signal of photo sensor. The control of dual axes is not an easy task due to nonlinear dynamics and unavailability of the parameters. Recently, artificial intelligent control of the fuzzy control, neural-network and genetic algorithm etc. have been studied. The fuzzy control made a nonlinear dynamics to well perform and had a robust and highly efficient characteristic about a parameter variable as well as a nonlinear characteristic. Hence the fuzzy control was used to perform the tracking system after comparing with error values of setting-up, nonlinear altitude and azimuth. In this paper designed a fuzzy controller for improving output of PV array and evaluated comparison with efficient of conventional PI controller. The data which were obtained by experiment were able to show a validity of the proposed controller.

## 1. 서 론

태양광 발전 시스템의 출력 효율을 높이기 위하여 일반적으로 태양전지 셀 자체의 효율을 높이거나 태양광 발전 제어용 전력변환 시스템의 변환효율 및 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 제어를 하여 높이는 방법, 태양이 항상 법선을 이루면서 태양전지 모듈에 입사되게 하는 추적식 방법 등을 이용하고 있다[1-2]. 태양광 발전 추적 시스템은 지리적인 위치의 위도와 경도를 시간의 변수로 사용하여 태양의 궤적을 추적하는 프로그램 방식과 광센서를 이용하여 광량 차이를 추적하는 센서 방식, 프로그램 방식과 센서 방식을 혼용한 방식 등으로 구성되어 있다. 센서방식의 추적장치 시스템의 경우, 태양광 발전의 효율 극대화를 위하여 태양광 센서 간의 오차를 줄이고 최대점 추적을 위한 적당한 전동기 전압을 발생시켜야 한다.

따라서 본 논문에서는 태양광 추적 시스템에 적용할 수 있는 PC 기반의 퍼지제어기 설계를 제시한다. PC 기반 퍼지제어기의 설계는 태양광 센서의 오차 변화에 따라 추적 시스템의 전동기 구동에 사용되며, 종래의 PI제어기에 의한 PV 어레이 출력을 비교하여 분석한다. 이로서 본 논문에서 제시한 제어기의 타당성을 입증한다.

## 2. 태양위치 센서 모델링

본 논문에서는 5개의 포토다이오드를 사용하여 태양 유무, 태양의 방위각 및 고도각 변화에 따른 태양의 위

치를 판별한다. 그림 1은 태양위치 센서의 구조를 도식적으로 나타낸다. 센서 하우징 외부에 설치된 포토다이오드 A는 태양이 일시적으로 구름에 가려있거나 또는 흐린 날씨를 판별하기 위한 것이며, 포토다이오드 B 및 D는 태양의 방위각 변화에 따른 태양추적을 위한 것이며, 포토다이오드 C 및 E는 태양의 고도각 변화에 따른 태양추적을 수행하기 위한 것이다.

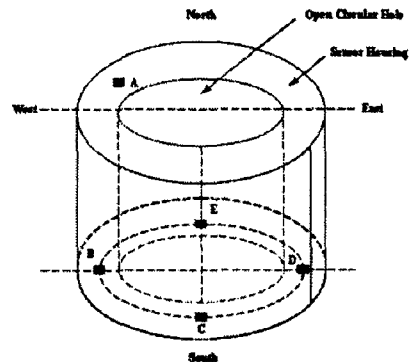


그림 1. 태양위치 센서의 구조  
Fig. 1 Structure of the sun position sensor

그림 2는 태양위치 센서의 동작원리를 나타낸 것이다. 그림 2(a)에서와 같이 태양위치 센서가 태양을 향하고 있을 때, 태양광선은 태양위치 센서의 법선방향으로 입사되며, 이와 같은 경우, 태양 위치 추적용 포토다이오드 B와 D로부터 발생하는 전압은 같게 된다. 따라서 태양추적 장치는 방위각에서의 추적 동작을 중지한다. 그러나 그림 2(b)와 같이 태양센서로 입사되는 태양광선이 센서의 법선방향과 경사각을 가지고 있으면

태양 추적용 포토다이오드 B로부터 발생하는 전압과 D로부터 발생하는 전압 사이에 오차가 발생되며, 이와 같은 경우 태양위치 추적장치는 방위각 추적을 위한 모터를 구동시켜 그림2(a)와 같이 포토다이오드 B와 D 사이의 발생하는 전압 오차가 Zero가 되도록 태양위치 추적을 수행한다.

태양 고도각 변화에 따른 태양위치 추적은 태양위치 센서의 포토다이오드 C 및 E를 사용하며 방위각 변화에 따른 태양위치 추적을 수행하는 것과 동일한 원리로 2축의 모터를 구동시켜 태양의 위치를 추적한다.

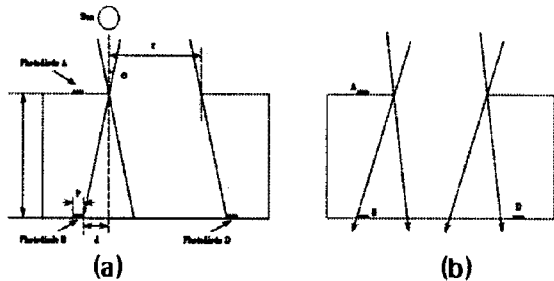


그림 2. 태양위치 센서의 동작원리  
Fig. 2 Operating principle of the sun position sensor

본 논문에서 사용된 태양위치 센서는 태양의 추적 가능 각도  $\alpha = \pm 60^\circ$ 로 설정하였고, 포토다이오드 A가 위치한 센서 하우징의 높이는  $h = 30\text{mm}$ , 직경 포토다이오드의 크기는  $p = 3\text{mm}$ 이다. 빛이  $\theta$ 만큼 기울어져서 비추면  $d$ 크기의 그림자가 생기고, 이 때,  $d$ 의 크기는 포토 다이오드의 위치가 되며 식 (1)을 통하여 구할 수 있다.

$$d = \tan\theta \times h \quad (1)$$

또한, 센서 상부의 개방 원지름  $r$ 은 높이와 추적 가능 설정각, 포토다이오드 크기 및 위치의 함수를 통하여 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$r = [\tan(\alpha) \times h] - (p + d) \quad (2)$$

### 3. 퍼지제어기의 설계

#### 3.1 퍼지화

제어기의 입력 변수들은 다음과 같이 정의되어 진다.

$$e(EW) = e(B) - e(D) \quad (3)$$

$$e(SN) = e(C) - e(E) \quad (4)$$

여기서,  $e(EW)$ 과  $e(SN)$ 는 각각 동-서(방위각)와 남-북(고도각) 방향의 전압 오차이고  $e(B)$ ,  $e(C)$ ,  $e(D)$ ,  $e(E)$ 는 센서 출력 전압을 나타낸다. 이것들의 변수들은 적당한 범위로 표준화되어 지고, 퍼지 설정의 언어학 변수로 변환된다. 7개의 언어학 변수는 다음과 같다.

- PB : Positive Big
- PM : Positive Medium
- PS : Positive Small

- ZE : Zero
- NS : Negative Small
- NM : Negative Medium
- NB : Negative Big

퍼지 설정은 논리 영역에서 각 요소에 대한 멤버십 값을 할당함으로써 정의된다. 본 논문에서는 삼각 파형의 멤버십 함수를 사용하였으며, 그림 3은 입력변수의 멤버십 함수를 나타낸다.

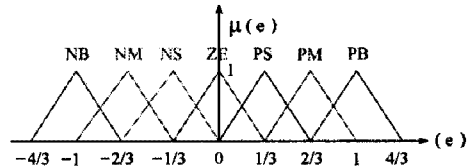


그림 3. 입력변수의 멤버십 함수  
Fig. 3 Triangular-shaped membership function of input variables

#### 3.2 퍼지 추론

퍼지 제어 룰은 수학적 모델링 보다는 감각적이고 태양 위치 추적 시스템의 동작에 대해 얻어진 경험으로 이루어진다. 퍼지 제어의 룰 베이스는 언어학상의 규칙을 통해 다음과 같은 간단한 구조를 나타낸다.

$$\text{if } e(k) \text{ is } A, \text{ Then } u(k) \text{ is } B \quad (5)$$

여기서  $e(k)$ 는 식(3)과 식(4)에서 정의된 센서 출력간의 오차이며,  $u(k)$ 는 퍼지제어기의 출력인 제어 입력을 나타낸다. 제어입력은 남-북(고도각) 제어를 위한 전동기 전압  $v_1$ 과 동-서(방위각)제어를 위한  $v_2$ 를 고려한다. 언어학의 변수들과  $v_1$ 과  $v_2$  양 측에 대한 멤버십 함수들은 입력변수와 같이 선택되어 진다. 다음과 같은 퍼지 규칙들은 양 측의 전동기에 대해 사용되어 지며 표 1은 전동기 전압에 대한 퍼지 규칙을 나타낸다.

표 1. 전동기 전압에 대한 퍼지 규칙  
Table 1. Fuzzy rule about motor voltage

입력 ( $e_{xy}$ )	출력 ( $v_i$ )
NB	NB
NM	NM
NS	NS
ZE	ZE
PS	PS
PM	PM
PB	PB

$$\text{여기서, } xy = \begin{cases} SN \rightarrow i=1 \\ EW \rightarrow i=2 \end{cases} \text{가 된다.}$$

위의 규칙은 다음의 측정 결과를 바탕으로 이루어졌다.

- a. 센서 전압  $e_{xy}$  값의 오차가 0 이면 양 측의 전동기는 정지한다.
- b. 센서 전압  $e_{xy}$  값의 오차가 양(+ )이면, 양(+ )의  $v_i$ 가 사라지도록 전동기는 정(+ )회전한다.

c. 센서 전압  $e_v$  값의 오차가 부(-)이면, 부(-)의  $v_i$ 가 사라지도록 전동기는 역(-)회전한다.

### 3.3 비 퍼지화

본 논문에서는 무게 중심법(Center of Gravity method)을 적용하였으며, 일반적으로 무게 중심법이 다른 방법들에 비해서 우월한 성능을 갖는다. 멤버십의 모든 요소들의 값을 모두 취하는 방법으로 다음 식(6)으로부터 계산할 수 있다.

$$COG = \frac{\sum_{i=1}^n v_i \cdot \mu_0(v_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_0(v_i)} \quad (6)$$

여기서,  $\mu_0(v_i)$ 는 출력변수  $v_i$ 의 멤버십 함수의 값이고,  $n$ 은 퍼지 집합의 개수를 나타낸다.

### 4. 시스템의 구성

PC 기반 제어의 장점 중 하나는 스탠드 어론 시스템의 조작기와 디스플레이 부분을 컴퓨터의 모니터나 키보드 및 마우스 등으로 대체하는 것이다. 즉, 스탠드 어론 시스템에서의 이 하드웨어를 컴퓨터로 사용함으로써 축소 또는 배제할 수 있다는 것이다. 본 논문의 제어 시스템 구성은 그림 4와 같고, 데이터 수집과 구동회로 및 PC와의 통신 등의 3개의 큰 부분으로 이루어졌다.

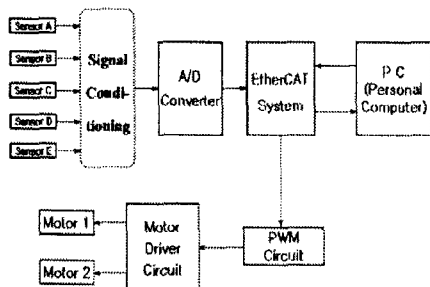


그림 4. 제어 시스템 구성도  
Fig. 4 Diagram of control system

전동기 구동회로는 적절한 두 축의 모션을 이루기 위해 두 전동기의 속도와 방향을 제어한다. 이러한 제어 방법을 통해 액추레이터 구동으로 태양광 어레이를 태양의 위치와 법선 방향으로 맞출 수 있으며, 이로써 발전 효율을 증가시킬 수 있다. 그림 5는 센서에 의한 태양광 추적 시스템의 제어 순서도를 나타낸다.

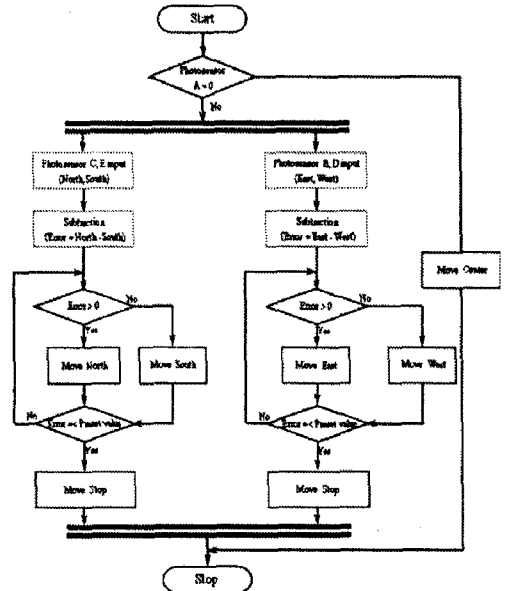


그림 5. 센서에 의한 태양광 추적 시스템의 제어 순서도.  
Fig. 5 Block diagram of control of solar tracking system

### 5. 실험 및 결과

그림 6은 종래의 PI 제어를 통한 동, 서 센서 및 전동기 동작특성을 나타내고, 그림 7은 퍼지제어를 통한 동, 서 센서 및 전동기 동작특성을 나타낸다. 퍼지제어는 종래의 PI제어와는 다르게 순간적인 전압오차, 즉 구름이 지나가거나 센서부에 일시적으로 먼지가 있을 경우에는 전동기가 동작하지 않았다.

그림 8은 종래의 PI제어를 통한 남, 북 센서 및 전동기 동작 특성을 나타내고, 그림 9는 퍼지제어에 의한 남, 북 센서 및 전동기 동작 특성을 나타낸다.

동, 서(방위각)제어와 마찬가지로 남, 북(고도각)제어에서도 퍼지제어는 순간적 전압 오차에 전동기는 구동하지 않았으며, 이는 구름이나 센서부의 이물질 등에 의한 일시적인 전압 오차 신호에 대해 전동기를 구동하지 않으므로 불필요한 전력소모를 줄일 수 있어 최종적으로 인버터의 출력을 증가할 수 있다.

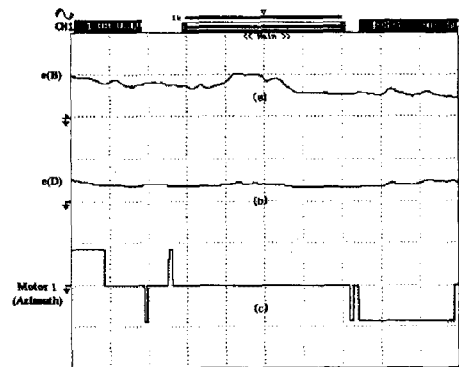


그림 6. PI제어에 의한 동작특성(동-서)  
Fig. 6 Response characteristics of PI control (east-west)

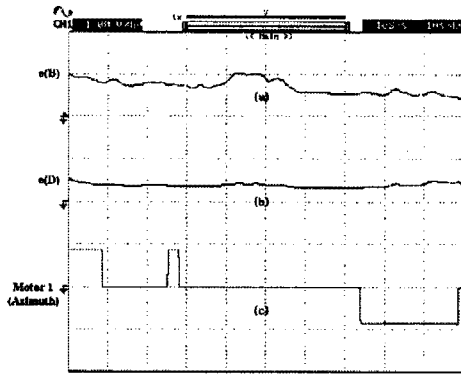


그림 7. 퍼지제어에 의한 동작특성 (동-서)  
Fig. 7 Response characteristics of fuzzy control (east-west)

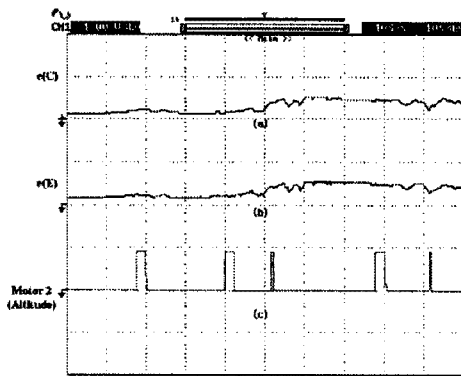


그림 8. PI제어에 의한 동작특성 (남-북)  
Fig. 8 Response characteristics of PI control (south-north)

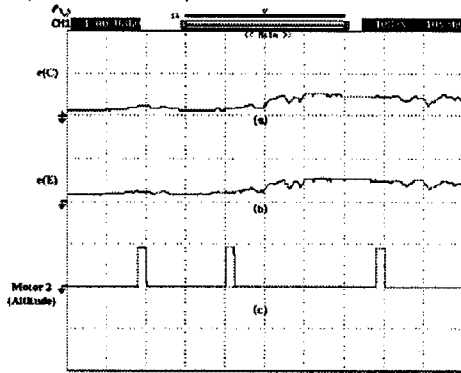


그림 9. 퍼지제어에 의한 동작특성 (남-북)  
Fig. 9 Response characteristics of fuzzy control (south-north)

그림 10은 일사량이 크게 변하지 않은 환경에서의 PI제어 및 퍼지제어에 의한 인버터 출력을 나타내고, 그림 11은 일사량의 변화가 클 경우에 PI제어 및 퍼지제어에 의한 인버터 출력을 나타낸다. 구름의 이동이 빈번하여 일사량 변화가 클 경우에는 퍼지제어에 의한 발전량이 종래의 PI제어에 의한 발전량에 비해 크게 나타나고 있다.

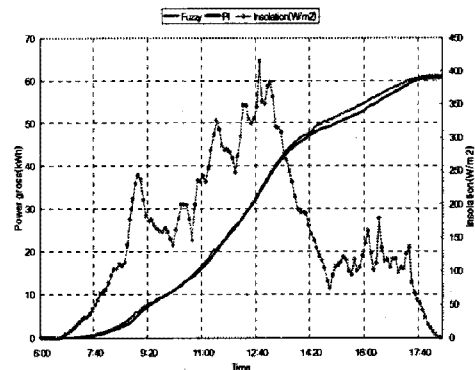


그림 10. PI제어 및 퍼지제어에 의한 발전량 (일사량 변화가 적은 환경)  
Fig. 10 Power gross with PI and fuzzy control (In little changing solar radiation)

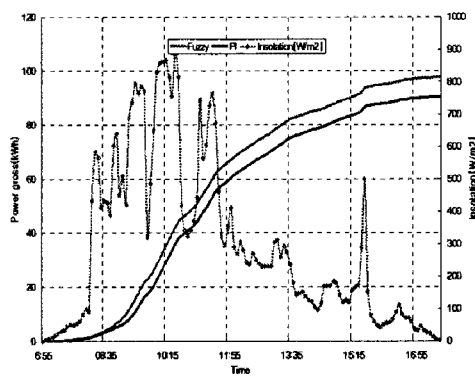


그림 11. PI제어 및 퍼지제어에 의한 발전량 (일사량 변화가 많은 환경)  
Fig. 11 Power gross with PI and fuzzy control (In much changing solar radiation)

## 6. 결론

본 논문에서는 추적식 태양광 발전 시스템의 효율을 높이기 위해 PC 기반 퍼지제어 알고리즘을 제안하였다. 종래의 PI제어에 의한 시스템은 일사량 변화에 관계없이 센서에 의한 전압오차가 발생될 때마다 전동기를 구동시켰다. 본 논문에서 제시된 퍼지제어 알고리즘은 일반적으로 센서의 전압오차에 따라 전동기를 구동시키며 특히, 일사량이 급변하는 경우 즉, 구름이나 먼지에 의해 순간적인 센서 전압 오차가 발생하는 경우, 전동기(액츄레이터)를 구동하지 않는다. 이로써 전동기의 불필요한 전력소모를 줄이며 인버터의 최종 출력인 발전량이 증가 되었다. 따라서 본 논문에서 제시한 퍼지제어 알고리즘의 태양 위치 추적의 우수성을 입증하였고, 실험을 통하여 타당성을 입증하였다.

## 참 고 문 헌

- (1) H. J. Noh, D. Y. Lee, D. S. Hyun, "An improved MPPT converter with current compensation method for small scaled PV-applications", IEEE IES, Vol.2 (2002), pp. 1113-1118.
- (2) R. Andoubi, A. Mami, G. Dauphin, M. Annabi, "Bond graph modelling and dynamic study of a photovoltaic system using MPPT buck-boost converter", IEEE ICS, Vol. 3(2002), pp. 200-205.