

퍼지제어를 적용한 태양광 발전의 고효율 추적시스템 설계

고재섭*, 최정식*, 정철호*, 김도연*, 정병진*, 정동화*

*순천대학교 전기제어공학과

High efficiency tracking system design of photovoltaic using fuzzy control

Ko, Jae-Sub*, Choi, Jung-Sik*, Jung, Chul-Ho*, Kim, Do-Yon*, Jung, Byung-Jin*,
Chung, Dong-Hwa*

*Department of Electrical Control Engineering, Sunchon University

Abstract

In this paper proposed the solar tracking system to use a fuzzy based on PC in order to increase an output of the PV 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.

Keywords : Tracking System, Fuzzy control, Dc motor

1. 서 론

현재 지구는 심각한 자원난과 더불어 1973년 유류파동 이후 새로운 대체에너지 개발과 활용이 절실히 요구되고 있다. 그 중에서도 태양에너지는 자원의 무한성과 무공해성으로 많은 관심을 받고 있다. 그러나 태양에너지의 활용은 많은 설비비와 효율성의 문제가 따르기 때문에 실용하는데 제한점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 태양광 발전의 추적시스템에 대한 연구가 이루어지고 있다[1]

태양이 항상 법선을 이루면서 태양전지 모듈에 입사되게 하는 방법으로 태양광 발전시스템의 발전 효율을 향상하기 위해서는 매우 정확하게 태양을 추적하기 위한 시스템이 필요하다. 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. 센서 방식의 추적장치 시스템의 경우, 태양광 발전의 효율 극대화를 위하여 태양광 센서 간

의 오차를 줄이고 최대점 추적을 위한 적당한 전동기 전압을 발생시켜야 한다.

지난 20년 동안, 퍼지 제어는 광범위한 산업에 적용이 입증되어 왔다.[2] 퍼지 로직 기반 제어기 설계는 수학적 모델링의 유효성보다는 시스템 동작에 대한 축적된 경험을 사용하여 설계되어 질 수 있다. 태양광 센서에 의한 빛의 피드백 추적 시스템은 두 개의 DC 전동기 속도 및 위치를 제어할 위해 동작한다. 그러한 추적 시스템의 제어는 비선형적 특성과 모델 파라미터의 불확실성으로 인해 쉽지가 않다. 그러므로 퍼지 제어는 요구된 추적의 수행을 위해 설계되어진다.

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 PI 제어기에 의한 PV 어레이 출력을 비교하여 분석한다. 이로서 본 논문에서 제시한 제어기의 타당성을 입증한다.

2. 태양위치 센서 모델링

본 논문에서는 5개의 포토다이오드를 사용하여 태양유무, 태양의 방위각 및 고도각 변화에 따른 태양의 위치를 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. 태양위치 센서에 의한 태양추적은 포토다이오드 A에 입사되는 태양 빛의 세기가 추적조건에 적합할 경우, 태양추적용 포토다이오드 B와 D 및 C와 E를 사용하여 추적을 수행하며, 태양이 일시적으로 구름에 가려 있는 경

우와 같이 포토다이오드 A로부터 생성되는 신호가 추적조건을 충족시키지 못할 경우, 시스템을 추적대기 모드로 전환시켜 추적을 중지한다.

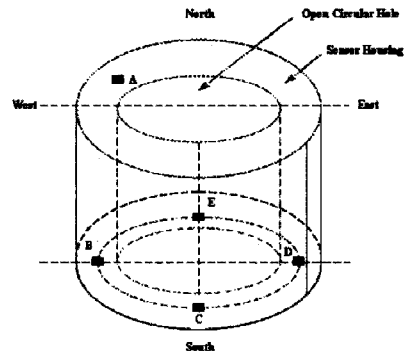


그림1. 태양위치 센서의 구조

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 그림2(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 D사이의 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.

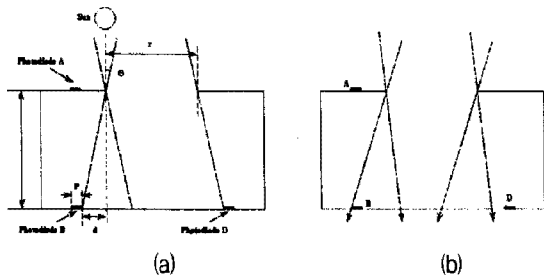


그림 2. 태양위치 센서의 동작원리

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 θ 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

종래의 PI 제어 등의 고전 제어이론에서 최근의 레귤레이터 제어 같은 현대 제어 이론까지 실제로 실용화되고 있는 대부분의 제어 이론은 수학적 모델에 의거한 방법이다. 그러나 이 방법으로는 플랜트의 특성이 외부조건에 의하여 수시로 변하거나 자체의 복잡성으로 인해 모델링 어려운 경우에 만족스러운 제어를 할 수 없다. 그러므로 이러한 제어방식의 적용이 곤란한 플랜트나 특히 액추레이터 등과 같이 장치는 정확한 모델링을 행하지 않고 인간의 경험이나 지식을 기초로 한 제어법칙에 의거하여 제어하는 것이 효과적일 수도 있다.

이와 같은 생각을 기초로 제어법칙을 규칙화하여 그 규칙에 의한 추론으로 제어나 판

단 등을 하려는 것이 지식 공학적 접근으로 대표되는 퍼지제어이다. 이러한 퍼지제어는 매리플래이터 제어, 이동로봇의 주행경로 선정, 자동차의 속도제어, 열차의 자동 운전 등 여러분야에 실제로 응용되고 있다.[3][4]

이동제어 시스템을 위한 퍼지 제어 알고리즘은 언어학의 제어 규칙들에 따라 시스템 구동의 지식을 표현하고, 이를 제어 대상에 적당한 크리슘(Crisp) 제어량으로 변환한다.[5][6]

이 시스템의 동작은 각 모터에 대한 두 개의 전기적인 방정식(전압방정식)과 동-서와 남-북을 제어하는 두 개의 기계적인 방정식(전동기 속도)을 통한 네 개의 선형 미분방정식으로 대략적인 모델링을 할 수 있다. 그러나 관성모멘트, 마찰계수 및 회전부의 진동 등의 파라미터는 알려지지 않았다. 그럼에도 불구하고 시스템의 동작에 대해 충분히 알고 있으므로, 전동기 전압(제어신호)들은 언어학상의 If-Then 규칙들의 항목으로 센서전압(입력신호)들과 관계 되어 질 수 있다. 따라서 두 개의 퍼지제어기는 태양 빛을 추적하기 위해서 적절한 전동기 전압을 생성하는 각 전동기에 대해서 제안되었다.

전형적인 퍼지제어기는 퍼지화(Fuzzification), 비 퍼지화(Defuzzification), 퍼지 제어규칙 및 퍼지 룰 베이스를 통한 퍼지 추론의 세부분으로 나눌 수 있으며 그림 3은 기본적인 구조를 나타낸다.

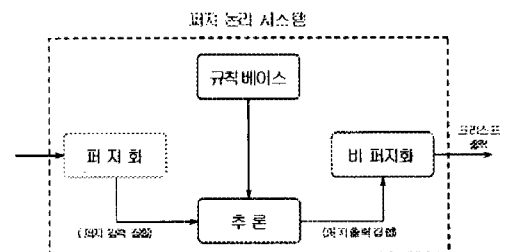


그림 3. 퍼지제어기의 기본적인 구조

퍼지화기는 퍼지하지 않은 시스템으로부터 얻은 출력오차를 퍼지한 값으로 변환하는 역할을 하며 비 퍼지화기는 퍼지 연산에 의해

언어인 퍼지 값으로부터 실제 플랜트를 제어 하기 위해서 필요한 제어 값을 만들어 내는 부분을 말한다.

3.1 퍼지화기

제어기의 입력 변수들은 다음과 같이 정의 되어 진다.

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

$$e(SM) = \alpha(C) - e(E) \quad (4)$$

여기서, $\alpha(EW)$ 과 $\alpha(SM)$ 는 각각 동-서(방위 각)와 남-북(고도각) 방향의 전압 오차이고 $e(B)$, $\alpha(C)$, $e(D)$, $e(E)$ 는 센서 출력 전압을 나타낸다.

퍼지 설정은 논리 영역에서 각 요소에 대한 멤버쉽 값을 할당함으로써 정의된다. 본 논문에서는 삼각 파형의 멤버쉽 함수를 사용하였으며, 그림 4는 입력변수의 멤버쉽 함수를 나타낸다.

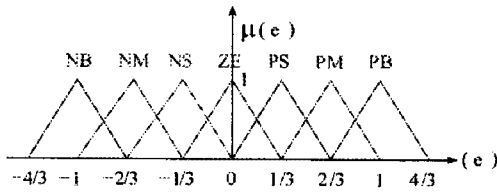


그림 4. 입력변수의 멤버쉽 함수

3.2 퍼지 룰 베이스

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 축에 대한 멤버쉽 함수들은 입력변수와 같이 선택되어 진

다. 다음과 같은 퍼지 규칙들은 양 축의 전동기에 대해 사용되어 지며 표 1은 전동기 전압에 대한 퍼지 규칙을 나타낸다.

표 1. 전동기 전압에 대한 퍼지 규칙

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

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

위의 규칙은 다음의 측정 결과를 바탕으로 이루어졌다.

- 센서 전압 e_{xy} 값의 오차가 0 이면 양 축의 전동기는 정지한다.
- 센서 전압 e_{xy} 값의 오차가 양(+)이면, 양(+)의 v_i 가 사라지도록 전동기는 정(+)회전한다.
- 센서 전압 e_{xy} 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. 멤버쉽의 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 멤버쉽 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 5와 같고, 데이터 수집과 구동회로 및 PC와의 통신 등의 3개의 큰 부분으로 이루어졌다.

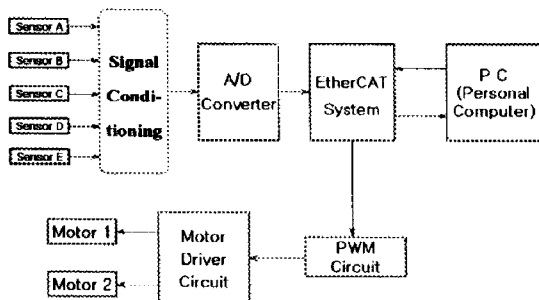


그림 5. 제어 시스템 구성도

태양위치 추적을 위한 센서부는 포토 다이오드 5개로 구성된 태양 위치 센서로서 광량을 입력받는다. 입력받은 광량은 Signal Conditioning 회로를 이용하여 전압으로 변환되고 A/D 컨버터는 입력받은 아날로그 전압을 디지털로 변환하여 전압레벨을 갖는다. 센서 신호의 전압레벨 정보는 산업용 필드버스인 EtherCAT을 통해 PC로 입력되며, PC에서 퍼지 알고리즘에 의한 제어량은 다시 통신을 통해 전동기 구동회로로 입력되어 최종적으로 두 축의 전동기를 구동하게 된다. 그림 6은 센서에 의한 태양광 추적 시스템의 제어 순서도를 나타낸다.

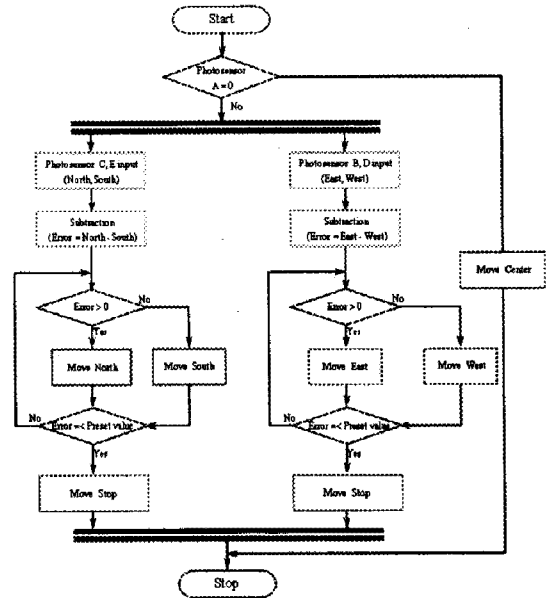


그림 6. 센서에 의한 태양광 추적 시스템의 제어 순서도.

5. 실험 및 결과

그림 7은 본 논문의 실험을 위한 전체 시스템 구성도를 나타낸다. 퍼지제어 알고리즘을 위한 PC와 통신부의 EtherCAT 및 추적형 태양광 발전 시스템으로 구성되며, 센서 및 전동기의 동작특성 분석을 위해 오실로 스코프를 추가하였다.



그림 7. 실험을 위한 전체 시스템 구성도

그림 8은 종래의 PI제어를 통한 동, 서 센서 및 전동기 동작 특성을 나타냈다. 그림 8(a)은 동쪽 포토다이오드의 동작 특성으로서 빛의 감지에 따른 센서의 전압을 나타낸 파형이고, 8(b)은 서쪽 포토다이오드의 동작 특성으로서 센서의 전압을 나타낸 파형이며,

8(c)은 동쪽과 서쪽 센서의 전압 오차에 따른 전동기의 동작 특성을 나타낸 것이다.

그림 9는 그림8과 같은 조건에서 퍼지제어를 통한 동, 서 센서 및 전동기 동작 특성을 나타낸 것이다. 퍼지제어는 종래의 PI제어와는 다르게 순간적인 전압오차, 즉 구름이 지나가거나 센서부에 일시적으로 먼지가 있을 경우에는 전동기가 동작하지 않았다.

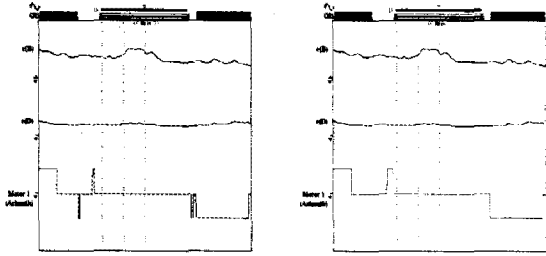


그림 8. PI제어에 의한 동 그림 9. 퍼지제어에 의한 작 특성(동-서) 동작 특성(동-서)

그림 10은 종래의 PI제어를 통한 남, 북 센서 및 전동기 동작 특성을 나타냈다. 그림 10(a)은 남쪽 센서의 전압, 10(b)은 북쪽 센서의 전압을 나타내며, 10(c)은 남쪽과 북쪽 센서 전압의 전압 오차에 따른 전동기의 동작 특성을 나타낸 것이다. 그림 11은 그림 10과 같은 조건에서 퍼지제어를 통한 남, 북 센서 및 전동기 동작 특성을 나타낸 것이다. 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.

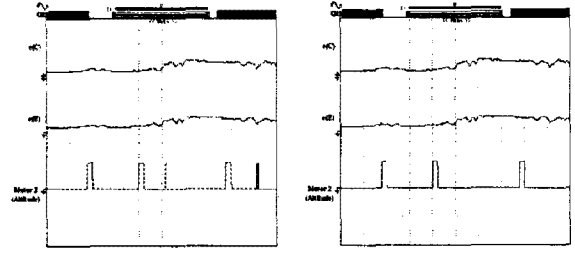


그림 10. PI제어에 의한 동작 특성(남-북) 그림 11. 퍼지제어에 의한 동작 특성(남-북)

그림 12는 일사량이 크게 변하지 않은 환경에서의 PI제어 및 퍼지제어에 의한 인버터 출력을 나타낸다. 일사량이 변화가 적은 환경에서는 퍼지제어에 의한 발전량이 종래의 PI제어에 의한 발전량에 비해 아주 미세하게 증가함을 알 수 있다. 그림 13은 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. 이는 인버터의 출력을 전동기의 전원으로 사용하게 됨으로서 결국 전동기의 불필요한 전력소모를 줄이는 퍼지제어가 발전량이 더 높게 나타났다. 따라서 종래의 PI제어보다 본 논문에서 제시한 퍼지제어 알고리즘이 발전 효율 증가를 위한 태양 위치 추적이 양호하게 나타나는 결과를 얻을 수 있었다.

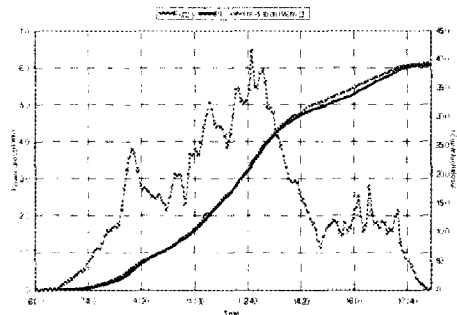


그림 12. PI제어 및 퍼지제어에 의한 발전량(일사량 변화가 적은 환경)

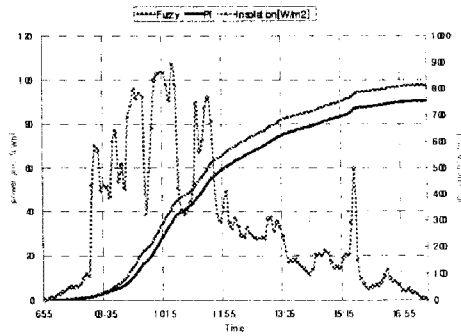


그림 13. PI제어 및 퍼지제어에 의한 발전량(일사량 변화가 많은 환경)

6. 결론

본 논문에서는 추적식 태양광 발전 시스템의 효율을 높이기 위해 PC 기반 퍼지제어 알고리즘을 제안하였다. PC 기반 제어의 EtherCAT은 종래의 통신 시스템에 비해 제어 속도가 매우 빠르게 나타났다. 추적식 태양광 발전 시스템의 전동기는 인버터의 출력을 피드백 받아 자체 발전되는 전압을 전원으로 사용한다. 따라서 전동기의 불필요한 전력소모를 줄이는 것은 전체 발전량을 높일 수 있다. 종래의 PI제어에 의한 시스템은 일사량 변화에 관계없이 센서에 의한 전압오차가 발생될 때마다 전동기를 구동시켰다. 그러나 퍼지제어 알고리즘은 일반적으로 센서의 전압오차에 따라 전동기를 구동시키며 특히, 일사량이 급변하는 경우 즉, 구름이나 먼지에 의해 순간적인 센서 전압 오차가 발생하는 경우, 전동기(액추레이터)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. 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.

2. M. Sugeno, editor, Industrial Applications of Fuzzy Control, North Holland, 1985.

3. V. G. Mauer, "A fuzzy logic controller for an ABS braking system," IEEE Trans. fuzzy Syst., vol. 3, pp. 381-388 Nov. 1995

4. V. G. Moudgal, W.A. Kwong, K. M. Passino and S. Yurkovich, "Fuzzy learning control for a flexible-link robots," IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 3, pp. 19-210, May 1995

5. Y. F. Li and C. C. Lau, "Development of fuzzy algorithms for servo systems", IEEE Control system Magazine, Vol. 9, no. 3, 1989, pp. 65-72.

6. C. C. Lee, " Fuzz logic in control systems: Fuzzy logic controller, part I", IEEE Trans. Syst., Man, and Cybern., Vol. 20, no. 2, 1990, pp. 404-418.