

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 24, No. 2, 2004

퍼지제어기를 이용한 태양광발전시스템의 MPPT 제어기 구현

조금배*, 최연옥**, 백형래***

*조선대학교 전기공학과(gbcho@chosun.ac.kr), **조선대학교 전기공학과(younok@chol.com),

***조선대학교 전기공학과(hlbaek@chosun.ac.kr)

The Realization of MPPT Controller Using Fuzzy Controller for Photovoltaic System

Cho, Geum-Bae*, Choi Yeon-Ok**, Baek, Hyung-Lae***

*Dept. of electrical engineering, Chosun University(gbcho@chosun.ac.kr)

**Dept. of electrical engineering, Chosun University(younok@chol.com)

***Dept. of electrical engineering, Chosun University(hlbaek@chosun.ac.kr)

Abstract

PV system is easy to operate and maintain than the other power generating system since it generally contains no moving parts, operates silently and requires very little maintenance. A solar cell generates DC power from sunlight whose power is different at any instance according to condition of irradiation and temperature variables. In order to improve the system utility factor and efficiency of energy conversion, it is desirable to operate the PV system at maximum power point of solar cell under different condition. This paper describes the experimental results of the PV system contain solar modules and a DC-DC converter(boost type chopper) using fuzzy controller. The experimental results show that the PV system always operates at maximum power point of solar cells having stabilized output voltage waveform with relatively small ripple component.

Keywords : 태양광발전시스템(photovoltaic system), MPPT(Maximum power point tracking), Fuzzy 제어기(Fuzzy controller)

1. 서 론

태양전지모듈이 아직까지는 고가이고 일사량, 소

자온도, 부하와 같은 외부환경 등에 따라 최대출력
점이 변하는 특성을 가지고 있으며 변환효율이 수
십 %정도밖에 되지 않기 때문에 가능한 많은 에너

지를 태양전지에서 얻을 수 있도록 해야하며, 항상 최대출력점에서 동작하도록 제어해야 할 필요가 있다.^[1,2] 일반적으로 최대출력점을 찾기 위한 방법으로는 Boehringer에 의한 Hill Climbing Method가 사용되는데 이 방법은 태양전지의 출력을 검출하여 단순히 비교하여 최대출력점을 추종해 가는 방법이다. 이 방법을 DC-DC 컨버터에 적용하는 경우 최대전력점을 찾는데 걸리는 시간과 전력의 맥동 사이에는 Trade-off 관계가 있으므로 추종시간이 길어질 뿐만 아니라 컨버터 출력맥동이 커지므로 에너지 변환효율을 저하시키는 요인이 된다.^[3,4,5] 그러므로 이러한 문제점을 보완하기 위하여 본 논문에서는 퍼지논리를 사용한 최대출력점 추종방법을 승압형 컨버터에 적용하여 최대전력점을 추적해 가는 방식을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 시뮬레이션을 통해 고찰하고 최대전력점 추적을 위한 승압형 컨버터의 시비율을 제어하기 위해서 마이크로 컨트롤러를 이용하여 스위칭 소자인 IGBT의 온, 오프를 제어하였고 기존방식의 제어방법에서 나타났던 Trade-Off 문제를 개선할 수 있었으며 최대출력점을 추종하면서 일정출력전압을 얻음을 실험을 통하여 입증하였다.

2. 이론적고찰

2.1 태양전지의 특성

태양전지는 한 개의 이상적인 다이오드와 I_{ph} 의 크기를 갖는 정전류원으로 구성되어 있지만 실제로는 이상적인 다이오드를 제작하는 것이 불가능하므로 접촉저항 및 표면층의 시트(sheet)저항 등을 표시하는 직렬저항 R_s 와 병렬저항 R_{sh} 를 고려해야 한다. 태양전지 표면에 입사하는 빛의 일부는 표면에서 반사되며, 표면을 투과한 빛은 태양전지 내에서 흡수되어 광자수는 지수함수적으로 감소한다.

그림 1은 빛이 조사될 때 광기전력효과(Photo-voltaic Effect)를 이용한 태양전지의 등가회로를 나타내고 있다.

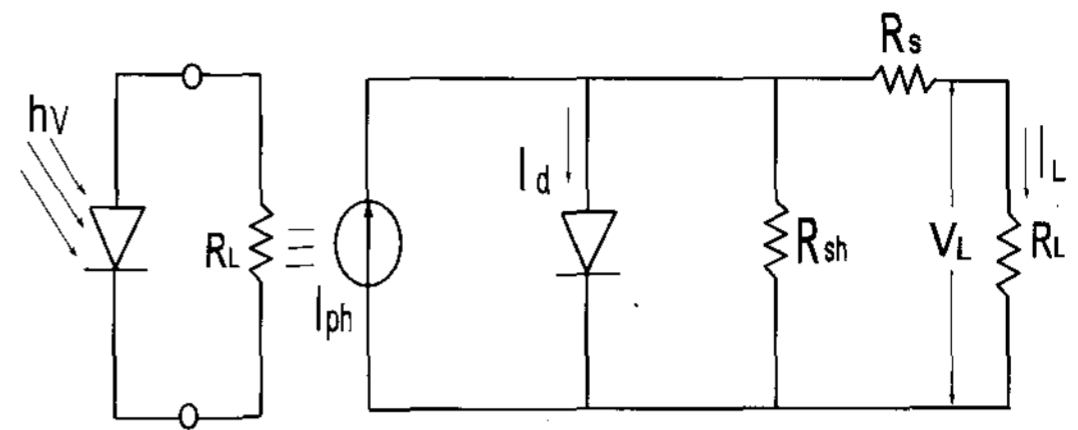


그림. 1 The equivalent circuit of solar cell

여기서 I_{ph} 는 입사된 빛에 의해 생성된 캐리어(Carrier)가 외부로부터 방해받지 않을 때 폐회로를 통해 흐르는 광전류이고, I_d 는 암전류로서 I_{ph} 와는 반대 방향이다. 병렬저항 R_{sh} 는 이상적인 다이오드 특성에서 벗어나 일정한 상수 저항으로 표시되는 누설저항을 나타내며, R_s 와 R_L 은 각각 전지 내부에 존재하는 직렬저항과 외부에서 걸어주는 부하저항을 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 I &= I_{ph} - I_d - V/R_{sh} \\
 &= I_{ph} - I_0(\exp qV/A_oKT - 1) - V/R_{sh} \dots\dots\dots (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_d = V + IR_s &= [A_oKT/q \ln \{ (I_{ph} - I/I_0) + 1 \}] + IR_s \dots\dots\dots (2)
 \end{aligned}$$

등가회로로부터 얻어진 식(1)과 식(2)로부터 아래 식(3)과 같이 태양전지의 출력전류를 구할 수 있다. 여기서 I_0 는 다이오드 포화전류이다.

$$\begin{aligned}
 I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \dots\dots\dots (3)
 \end{aligned}$$

그림 1에서 광 투사시 $R_s=0$, $R_{sh}=\infty$ 인 이상적인 PN접합 다이오드인 경우 부하에 흐르는 전류 I_L 은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_L = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right] \quad \dots\dots\dots (4)$$

여기서, I_L 은 출력전류, I_{ph} 는 광전류, I_0 는 다이오드 포화전류, n 은 다이오드 상수, K 는 볼츠만 상수이고 q 는 전자의 전하량이다.

그리고 일정온도와 일정 일사조건에서 태양전지의 전압-전류 특성 곡선은 그림 2와 같이 된다.

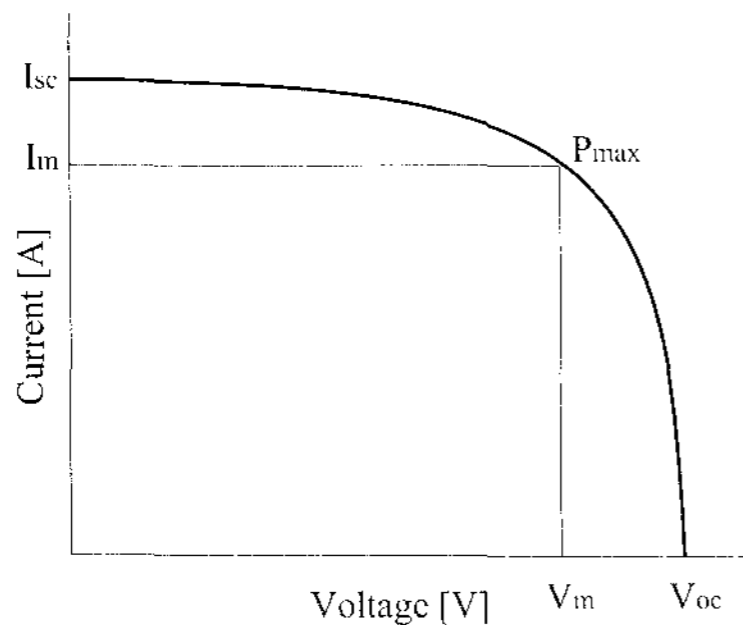


그림. 2 The voltage and current curve of solar cell

여기서 개방전압 V_{oc} , 단락전류 I_{sc} , 충전율 FF (Fill Factor)등 3개의 변수는 에너지 변환 효율과 관련되는 파라미터로서, 식(4)로부터 $I_L=0$ 인 조건에서 개방전압 V_{oc} 는 식(5)와 같다.

$$V_{oc} = \frac{nKT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

단락전류 I_{sc} 는 $V_L=0$ 인 조건으로부터 $I_{sc}=I_{ph}$ 가 된다. 전지에 연결된 부하저항의 크기를 조정함으로써 어떤 최적 동작점에서 최대의 출력 P_{max} 가 얻어지게 된다.

$$P_{max} = V_m \cdot I_m \quad \dots\dots\dots (6)$$

부하저항에서 소비되는 에너지를 P_{out} 라 하면

$$P_{out} = V \cdot I = V \cdot I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right] \quad \dots\dots\dots (7)$$

최적부하조건에서 $\frac{dP_{out}}{dV} = 0$ 이므로 최적동작전압 V_m 은

$$V_m = \exp\left(\frac{qV_m}{nKT}\right) \left(1 + \frac{qV_m}{nKT}\right) = \left(\frac{I_{ph}}{I_0}\right) + 1 \quad \dots\dots\dots (8)$$

을 만족한다. 또한 이때의 최적동작전류 I_m 은

$$I_m = \frac{(I_{ph} + I_0) \cdot (qV_m/nKT)}{1 + (qV_m/nKT)} \quad \dots\dots\dots (9)$$

가 된다. P_m 이 커지기 위해서는 특성곡선에서 I_m 과 V_m 이 I_{sc} 와 V_{oc} 에 가까워야 한다.

그리고, 태양전지의 특성을 평가하는데 있어서 단락전류, 개방전압과 더불어 가장 중요한 요소 중의 하나는 충전율이며 식(10)과 같이 정의된다.

$$FF = (V_m \times I_m) / (V_{oc} \times I_{sc}) \quad \dots\dots\dots (10)$$

또한, 태양전지의 에너지 변환효율은 태양전지에서 얻을 수 있는 최대의 전기 에너지를 입사광에너지로 나눈 값으로 다음식 (11)과 같다.

$$\eta = \frac{V_m \times I_m}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \times I_{sc}}{P_{in}} \times FF \quad \dots\dots\dots (11)$$

여기에서, P_{in} 은 입사된 태양광 에너지이다.

따라서 태양전지의 효율을 높이기 위해서는 단락전류 I_{sc} , 개방전압 V_{oc} , 그리고 충전율 FF 를 높여야 한다.

2.2. MPPT 제어

태양전지의 출력특성은 일사량, 동작전압 및 온도 등에 따라 동작특성이 변하고 최대출력점도 항상 변하고 있다. 여기서 태양전지의 출력특성은 전장에서 설명한 것처럼 일사량 변화에 따른 태양전지의 최적동작점인 출력전력의 P_{max} 점을 각각 가지고 있는데 이 P_{max} 점이 각 일사량 값에서 태양전지 에너지효율이 가장 높은 점이라 할 수 있다.

최대전력점에서 항상 동작하기 위해서는 전력변환장치가 필요하며, 본 논문에서는 승압형 초퍼를 이용하여 MPPT제어를 행했다. 승압형 초퍼를 이용한 MPPT 제어방법에는 정전압제어법, 극치탐색법, 비선형 함수발생기에 의한 제어법, 임피던스비교법 등으로 분류된다.

어떠한 변환기를 사용하든지 태양전지에서 발생된 최대전력점 P_m 의 동작전압 V_m 을 유지하기 위해서는 컨버터의 스위칭 시간을 적절하게 조절해야 한다. 태양전지의 동작상태는 일사량이나 온도 등에 따라 항상 변하기 때문에 회로구성은 밀폐형 고리를 갖도록 해야한다.

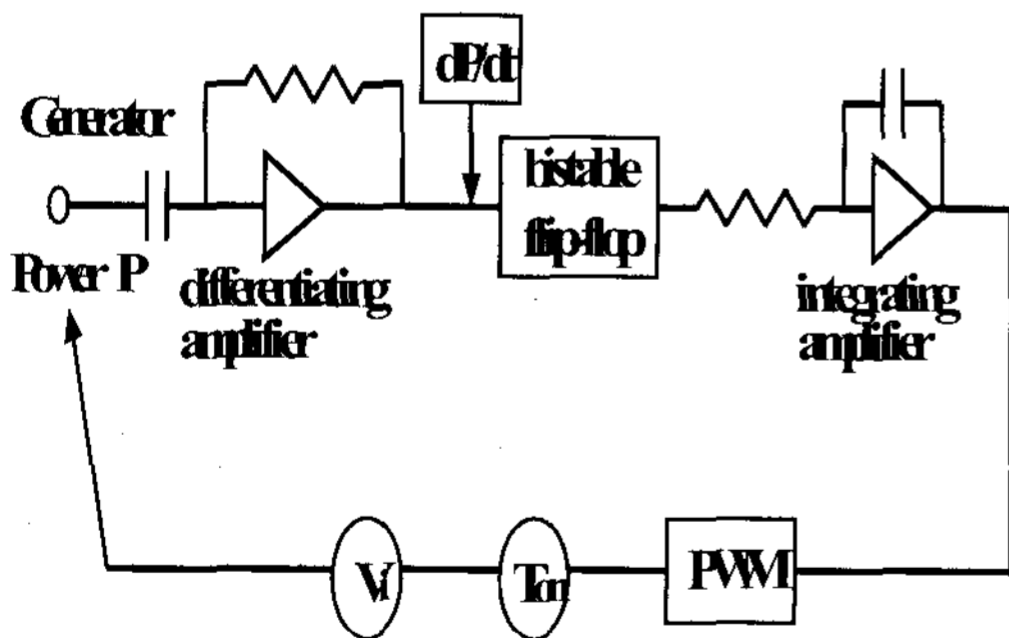
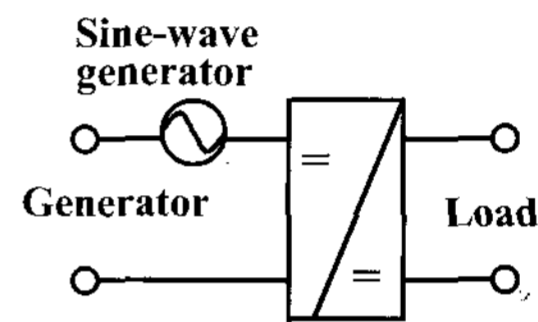


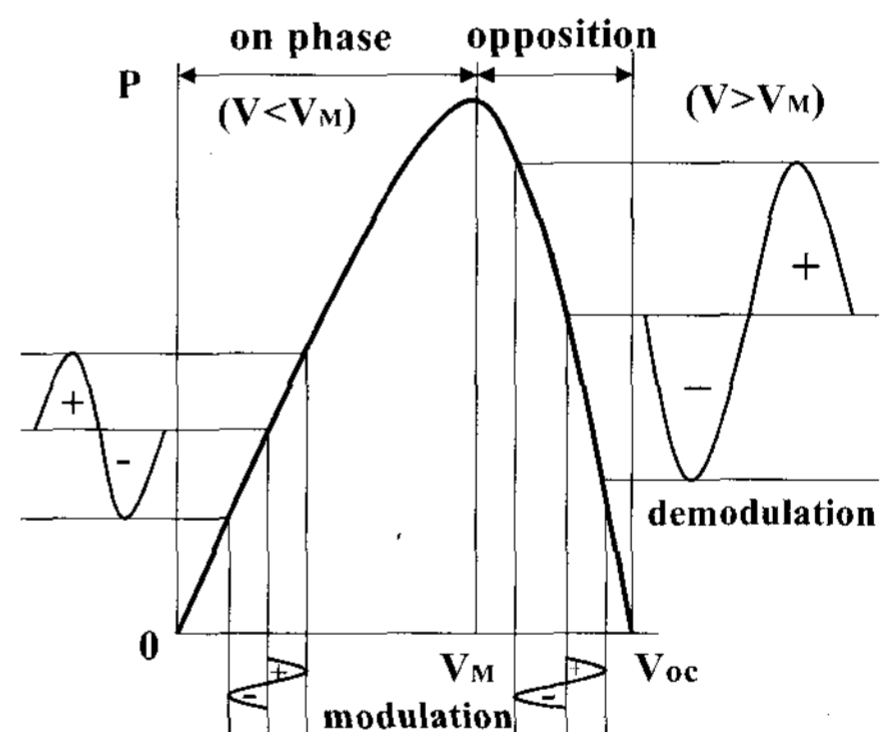
그림. 3 Schematic diagram of power differentiating MPPT loop

MPPT 제어회로는 발전전력의 영상신호에 의해 유지되는데, 대부분 이 신호는 그림 3과 같이 아날로그 증폭기의 출력으로 이용하게 되며, 여기서 발전측 전압과 전류는 직렬로 연결된 분류기에서 측정

하여 입력되고 그림 4에서와 같이 교류변조신호를 발전측 전압에 적용시킨다. 즉, 변조신호를 가지고 발전측 전력신호와 동기시켜서 최대 출력전압점에 표시될 수 있도록 동작시키는 방법이다. 그리고 회로에서는 변조된 펄스폭이 T_{on} 상태에서 적절한 정보를 제공해야 하며, 따라서 최적전압을 기대할 수 있게 된다. 또한, 최대출력점에 직접 적용시키는 방법으로 steady state 상태($dP=0$)에서 시간에 대한 미분증폭은 dP/dt 에 비례하게 된다.



(a) circuit



(b) Modulation/demodulation principle

그림. 4 MPPT by modulation/demodulation

점등식 발전방식은 연속적인 변화량을 펄스폭 변조를 이용하여 T_{on} 안에서 동작시켜 감지한다. 만일 그 후의 전력 변화 dP/dt 가 양이면 동작점은 계속 최대전력점으로 이동하게 된다. 그러나 전력변화(dP/dt)가 음이면 Flip-Flop이 반안정 상태에서 출력측 스위치가 음이 되며 적분 증폭기의 점등기 신호가 바뀌면서 발전측 전압변화가 역으로 된다. 그리고 시스템은 PWM 주파수와 증폭기의 정

밀도와 비교한 주파수로서 최대전력점 주위에서 진동한다.

오늘날 PWM 제어기는 반도체소자의 급속한 발전으로 여러 분야의 전자회로에 적용되고 있다.

최근에 개발된 C-MOS를 이용한 MPPT 제어회로는 강압형 컨버터와 승압형 컨버터에 높은 효율 향상을 가져왔으며, 효율이 95%에 이르는 것으로 알려지고 있다. 이와 같은 고효율 디바이스는 세심한 설계와 최적의 부품을 선택함으로써 가능하다. 따라서 MPPT 제어용 DC-DC 컨버터를 이용함으로써 20%가량의 태양전지 설치용량을 줄일 수 있다면 충분히 경제성이 있는 것으로 알려져 있다.

2.3. Fuzzy 제어기

태양전지의 출력특성은 일사량 및 온도 등에 따라 항상 변하고 있으므로 최대전력출력점도 항상 변화하는 것을 알수 있는데 본 논문의 제어기의 목적은 어떠한 일사량 변화에 대해서도 빠른 시간에 섭동없이 정확하게 최대전력점에서 운전할수 있도록 제어하는데 있다.

퍼지제어기는 2개의 입력변수를 갖는데, 샘플링 구간 k에서의 입력변수 E(k)와 CE(k)는 다음과 같이 정의된다.

$$E(k) = \frac{V_{ph}(k) \cdot I_{ph}(k) - V_{ph}(k-1) \cdot I_{ph}(k-1)}{I_{ph}(k) - I_{ph}(k-1)} \dots\dots\dots (12)$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1) \dots\dots\dots (13)$$

퍼지언어변수는 7단계, 즉 PL(Positive Large), PM(Positive Middle), PS(Positive Small), ZO(Zero), NS(Negative Small), NM(Negative Middle), NL(Negative Large)로 정하였으며, 그림 5는 입출력에 대한 7개의 기본 언어변수에 따른 삼각형 모양의 소속함수를 갖도록 하였다.

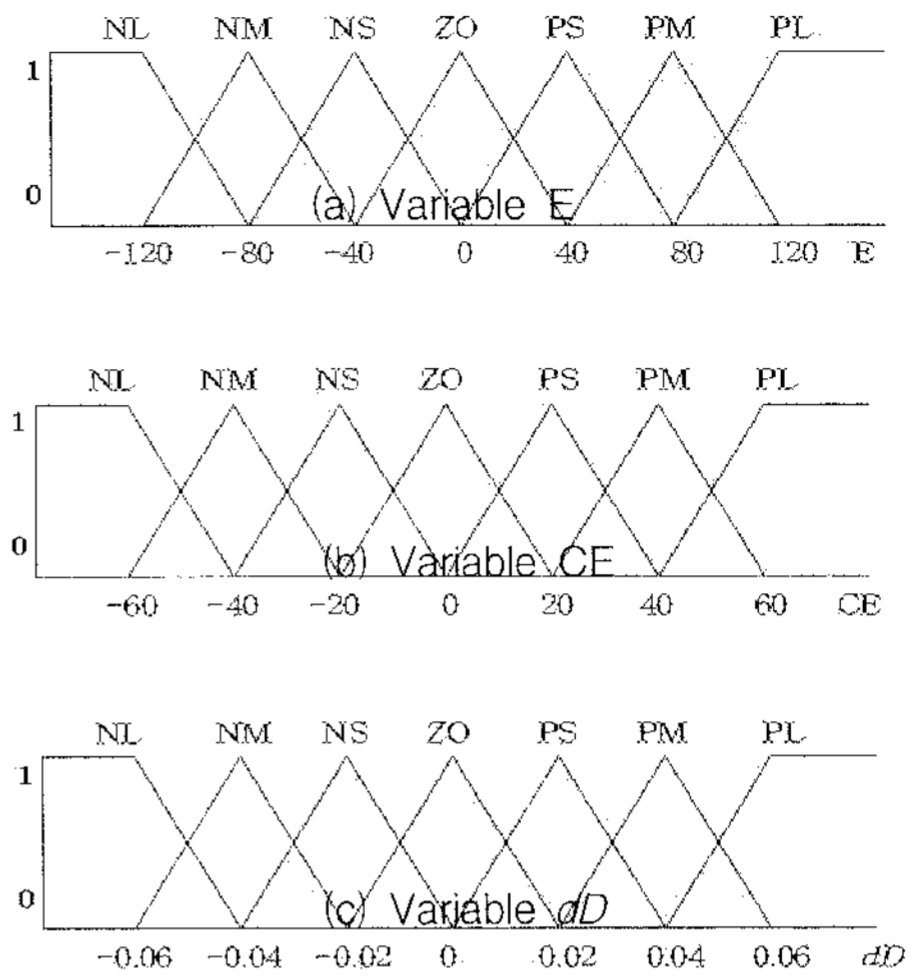


그림. 5 The membership function for the input E and CE, output dD

표 1은 퍼지제어기의 제어규칙을 나타내는데 여기서 행렬의 각각의 요소들은 E(error), CE와 컨버터의 시비율 변화량 dD를 나타낸다.

표 1 Fuzzy Rule Table

E \ CE	NL	NM	NS	ZO	PS	PM	PL
NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	ZO
NM	NL	NL	NM	NM	NS	ZO	PS
NS	NL	NM	NS	NS	ZO	PS	PM
ZO	NL	NM	NS	ZO	PS	PM	PL
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PL
PM	NS	ZO	PS	PM	PM	PL	PL
PL	ZO	PS	PM	PL	PL	PL	PL

“ IF E is PL AND CE is ZO THEN dD is PL.” 즉, 전류에 대한 전력의 특성곡선에서 기울기가 매우 크고 그 기울기에 대한 변화량이 없으면 제어출력값을 매우 크게 증가시키라는 의미이며 결국 입력신호 E를 zero가 되도록 제어규칙을 설계해야 한다.

제어기의 출력값은 퍼지변수로서 소속함수로 표현되는 반면, 실제 플랜트에는 퍼지변수가 적합하지 않으므로 플랜트에 적합한 보통값으로 변환하는 과정인 비퍼지화 단계가 필요하다. 일반적인 비퍼지화 방법으로는 최대평균방법과 무게중심방법을 많이 사용하는데, 본 연구에서는 무게중심방법을 이용하고 이산적인 계산을 수행하기 위해서는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$dD_n = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(dD_j) \cdot dD_j}{\sum_{j=1}^n \mu(dD_j)} \quad \dots\dots\dots (14)$$

여기서, n은 제어입력 변화량에 대한 양자화 단계이고, dD_j 는 j번째 양자화 단계에서 제어입력 변화량을 의미하며, $\mu(dD_j)$ 는 그 변화량에 대한 소속함수값을 나타내고 있다.

3. MPPT 제어 시뮬레이션

본 논문에서는 태양광어레이 출력을 최대전력점(MPPT)에서 동작하여 안정된 출력전류를 얻기 위한 제어 시뮬레이션을 수행하였다.

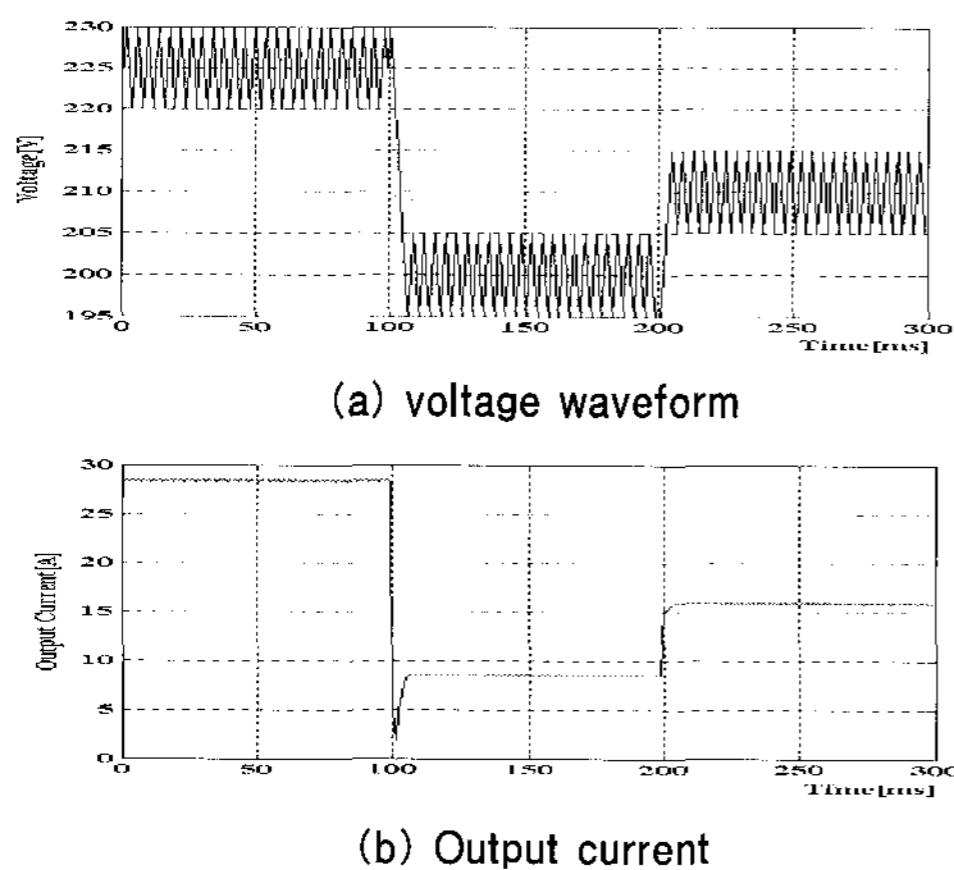


그림. 6 Output characteristics according to variation insolation in conventional method

그림 6 및 그림 7은 각각 기존의 제어기 및 Fuzzy control로 구현한 MPPT 시뮬레이션 출력 파형을 나타낸 것으로 일사량을 0에서 100 [ms] 동안에는 1000 [W/m²]로 설정하고 100 [ms]에서 200 [ms] 구간에는 어두운 환경을 가상하여 250 [W/m²]의 일사량으로 설정하였으며 200 [ms]에서 300 [ms] 구간에는 약간 어두운 기상 조건을 가상하여 500 [W/m²]의 일사량으로 시뮬레이션을 수행하였다. 정상적인 주기로 MPPT 동작 기준전압이 225 [V]로 추종되어 동작하지만 명암 변화시 속응특성이 떨어짐을 확인할 수 있으나 제어가 수행되고 있음을 알 수 있다.

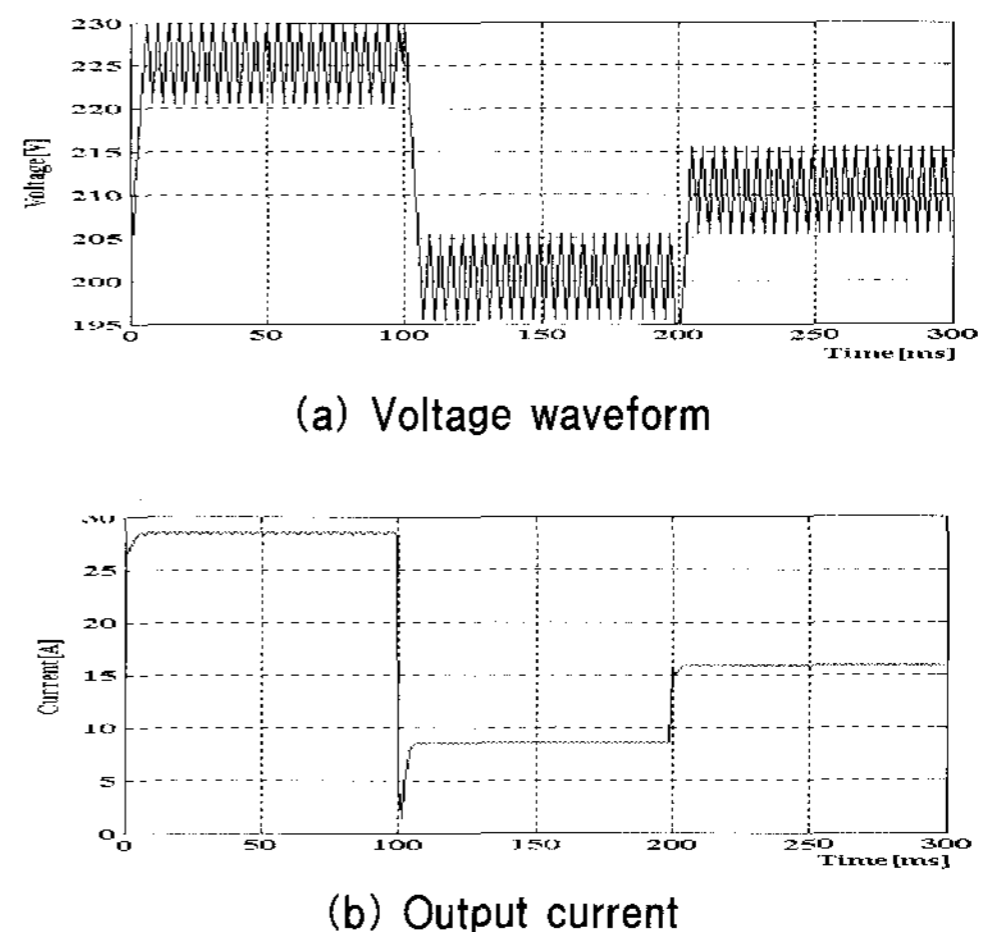


그림. 7 Output characteristics according to variation insolation in fuzzy control method

4. 실험결과 고찰

그림 8과 그림 9는 구름낀 날씨에서의 입출력전압, 전류, 전력계적의 파형을 나타낸다. 이때 입력전압 및 전류가 불안한 상태이지만 입출력전력계적곡선에서 알 수 있듯이 MPPT를 추종하고 있음을 알 수 있다. 그림 10과 그림 11은 기상조건이 좋았을 때 각 파형들을 나타내고 있으며 구름낀 날씨에서의 파형보다 더 안정된 특성이 나타남을 알 수 있다.

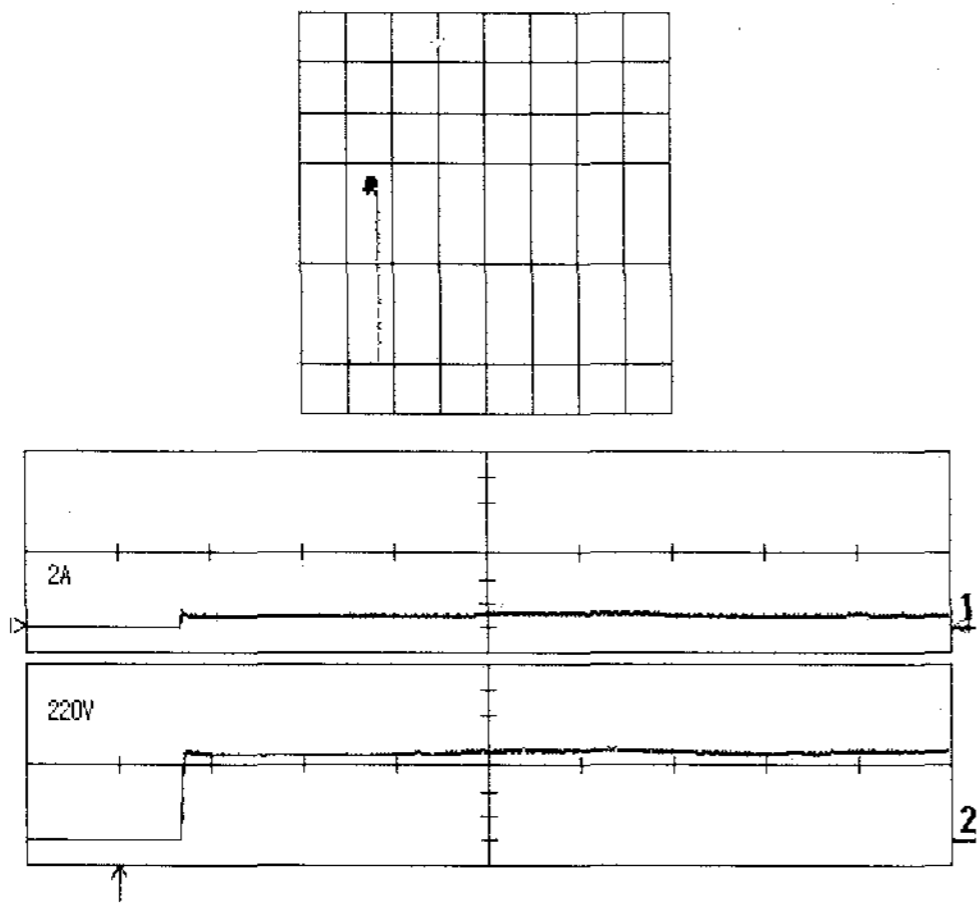


그림. 8 The power trajectory for V, I without MPPT control at cloudy day light

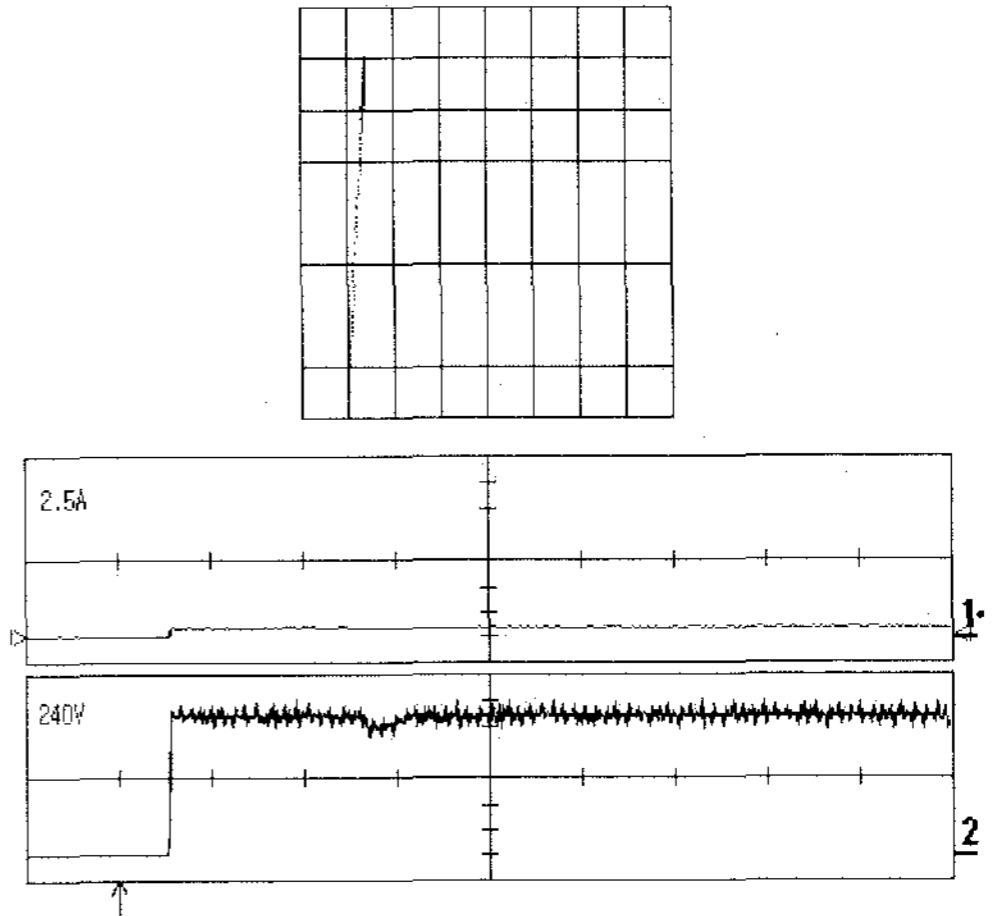


그림. 10 The power trajectory for V, I without MPPT control at normal day light

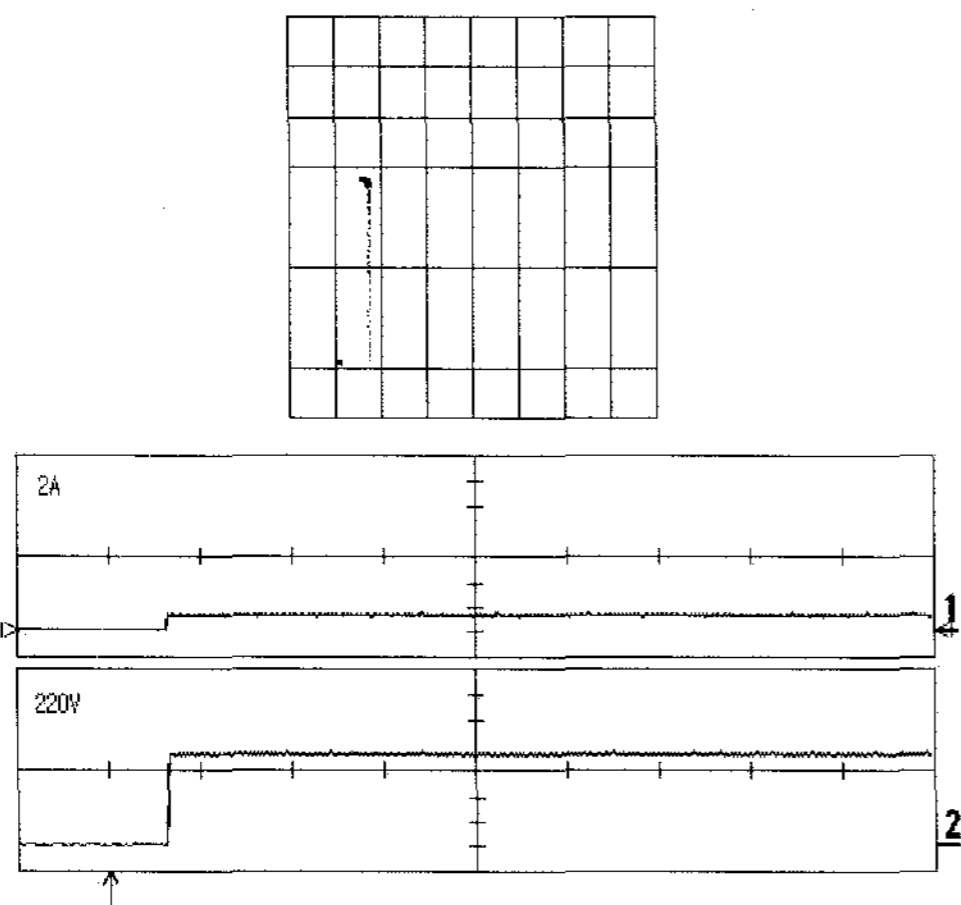


그림. 9 The power trajectory for V, I with Fuzzy MPPT control at cloudy day light

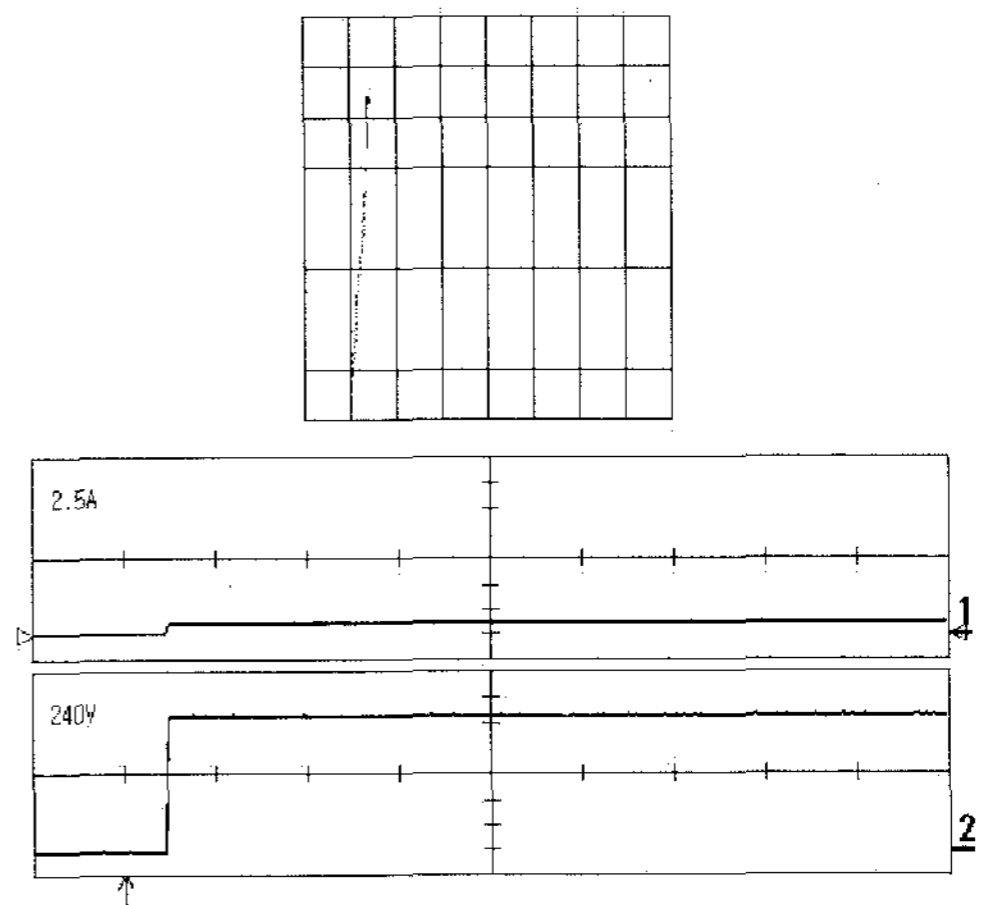


그림. 11 The power trajectory for V, I with Fuzzy MPPT control at normal day light

5. 결론

본 논문에서는 Fuzzy 제어를 사용한 최대전력 추종제어방식을 제안하였고 제어기의 특성을 평가, 검토하였다. 제안된 알고리즘은 시뮬레이션을 통하여 고찰하였고 제작한 승압형 컨버터의 제안된 알고리즘의 우수성을 확인하였다.

제안된 퍼지제어기는 Boehring에 의한 Hill Climbing Method에서 Trade-off관계로 인하여

추종시간의 길어지는 문제와 커다란 맥동이 나타났던 문제점을 보완할 수 있었고, 시뮬레이션 및 실험에서 섭동이 거의 없이 최대전력을 추종하는 것을 확인했으며 그 결과 빛에너지를 전기에너지로 변환하는 태양광발전시스템의 에너지변환효율이 향상됨을 알 수 있었다. 또한 일사량 변화에 따른 태양 전지어레이 출력전력을 시제작한 승압형 초퍼로 안정화된 출력전압을 얻을 수 있었으며 실험결과에서 볼 수 있듯이 MPPT제어가 됨을 알 수 있었다. 따

라서 본 논문에서는 최대전력점을 찾는데 걸리는 시간과 이를 추종하는 시간을 최소화했을 뿐만 아니라 컨버터 출력맥동을 줄여 에너지변환효율을 저하시키는 요인이 개선됨을 볼 수 있었다.

후 기

이 논문은 2001년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참 고 문 헌

1. H. Chihchiang and S. Chihming, "Study of Maximum Power Tracking Techniques and Control of DC/DC Converter for Photovoltaic Power System," in IEEE PESC Power Electronics Specialists Conf., Vol.1, 1998
2. N. Khaehintung, P. Sirisuk and W. Kurutach, "A novel ANFIS controller for maximum power point tracking in photovoltaic systems," in IEEE PEDS, 2003, Singapore, Nov. 2003.
3. Mummadi veerachary, Tomonobu senjyu, Katsumi uezato, "Feedforward Maximum Power Point Tracking of PV Systems Using Fuzzy Controller", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems Vol.38, No.3, July 2002
4. Hasan A. Yousef, "Design and Implementation of Fuzzy Logic Computer-Controlled Sun Tracking System" ISIE'99, pp1030-1034, 1999
5. Gwonjong Yu, Jinsoo Song, "Development of Power Converter for Photovoltaic System", Japan-Korea Joint Seminar on Technical Digest Photovoltaics, pp. 247~254, 1995