

## 태양전지 어레이를 위한 최대 전력점 추종기에 관한 연구

이상용, 김한구, 오방원, 김홍성, 최규하  
 건국대학교 전기공학과

### A study on maximum power Point tracker for solar array

S.Y. Lee, H.G. Kim, B.W. Oh, H.S. Kim, G.H. Choe  
 Dept. of Electrical Engineering, Konkuk University

#### ABSTRACT

The output of solar array is changed non-linearly by variation of insolation and temperature. Hence, as varying insolation and temperature, Maximum Power Point Tracking(MPPT) is necessary to increase generation efficiency of solar array.

This paper presented MPPT algorithm using position control of output voltage and current of solar array and implemented hardware MPP tracker which is appropriate and inexpensive for low power system(ten s~hundreds watt). Finally, those were verified through simulation.

#### 1. 서 론

태양전지는 그 출력이 일사량과 태양전지 표면온도 변화에 의해 시시각각 변하고 이에 따라 태양전지 어레이 출력이 비선형적으로 변하며 태양전지의 발전효율을 증가시키기 위해서는 일사량과 온도변화에 따른 태양전지 어레이의 최대 전력점 추종(Maximum Power Point Tracking)은 필수적이다.<sup>(1)</sup> 본 논문에서는 크기 및 가격대비 저전력(수십~수백[W]) 태양광 시스템에 적합한 최대 전력점 추종을 위한 알고리즘을 제안하였고 이를 간단한 회로로 구현하였으며, 이를 시뮬레이션 하였다.

#### 2. 제안된 최대 전력점 추종원리

그림 2-1의 (a)처럼 태양전지 어레이의 출력전류  $I_{sol}$ 에 (1-m)배 만큼의 이전 값  $(1-m)I_{sol_{old}}$  이 hold 되고 컨버터의 Duty가 감소하면서 태양전지 어레이에서 센싱된 새로운 출력전류와 전압  $I_{sol_{new}}, V_{sol_{new}}$  은 각각 감소, 증가한다. 새로운 출력전류  $I_{sol_{new}}$ 이 감소하다가 hold된 이전의 출력전류  $(1-m)I_{sol_{old}}$  보다 작게 되면 (1-m)배 만큼의 이

전 출력전압  $(1-k)V_{sol_{old}}$  이 hold되고 컨버터 듀티는 다시 감소하게 된다. 그리고  $I_{sol_{new}}$ 와  $V_{sol_{new}}$ 는 각각 증가, 감소한다. 이것을 (b)에 나타내었다. 그림 2-1의 (c)와 같이  $V_{sol_{new}}$ 가 감소하다가  $(1-m)V_{sol_{old}}$  보다 작아지면 다시 (a)와 같이  $(1-m)I_{sol_{old}}$  값은 hold 되고 듀티는 감소하며  $I_{sol_{new}}$ 는 감소하고  $V_{sol_{new}}$ 은 증가한다. 이때 그 폭은 점점 감소하여 (d)와 같이 m의 범위에 도달하게 된다. 이와 같이 제안한 태양전지 어레이의 최대 전력점 추종원리는

$$V_{sol_{new}} = (1-m)V_{sol_{old}} \quad (1)$$

$$I_{sol_{new}} = (1-m)I_{sol_{old}} \quad (2)$$

여기서, m는 최대 전력점 추종 상수,  $0 < m < 1$

태양전지 어레이의 출력전압과 전류의 위치를 센싱하여 식(1), (2)와 같이 어레이 출력 전압과 전류의 이전 값과 새로운 값을 서로 비교하여 그 값이 서로 같아질 때까지 최대 전력점을 추종하는 것이다.

그리고 그림 2-1의 (d)를 그림 2-2의 (a)와 같이 전류의 상대적인 비와 전압의 상대적인 비로 나타낼 수 있다. 여기서  $\Delta v$ (또는  $\Delta i$ )는  $mV_{sol}(mI_{sol})$ 을 의미한다.

$$P = V \times I \quad (3)$$

$$dP = d(V \times I) = 0 \quad (4)$$

$$\text{따라서, } \frac{V}{I} = - \frac{dv}{di} \quad (5)$$

$$\frac{V}{I} = \left| - \frac{\Delta v}{\Delta i} \right| \quad (6)$$

$$\frac{V}{I} = \frac{\Delta v}{\Delta i} \quad (7)$$

$$Z = \Delta Z \quad (8)$$

식(5)의 절대치를 식(7)과 같이 나타낼 수 있으며 이것을 정적임피던스와 동적임피던스로 표현하면 식(8)과 같이 나타낼 수 있다. 이것은 정적임피던스가 동적임피던스와 같을 때 최대 전력점을 추종하게 됨을 의미한다. 그림 2-2의 (b)는 450[W] 태양전지 어레이의 최대 전력점 추종 시 정적임피던스와 동적임피던스를 나타낸다. 최대전력점 추종은 그림 2-2의 (b)에서 정적임피던스와 동적임피던스가 같을 때 발생한다. 최대 전력점에서 정적임피던스와 동적임피던스는 각각 5.856[Ω]으로서 일치함을 알 수 있다.

이때 동작점이 최대 전력점 전압보다 작은 전압 ( $\frac{V}{I} > \frac{\Delta v}{\Delta i}$ ) 인 구간에 동작점이 존재할 때 어레이 출력은  $\frac{V}{I} = \frac{\Delta v}{\Delta i}$ 가 되는 점으로 이동하도록 동작하며, 반면에 동작점이 최대전력점보다 큰 전압일 경우 ( $\frac{V}{I} < \frac{\Delta v}{\Delta i}$ ) 인 구간에 존재할 경우  $\frac{V}{I} = \frac{\Delta v}{\Delta i}$ 가 되는 점으로 이동하게 된다.

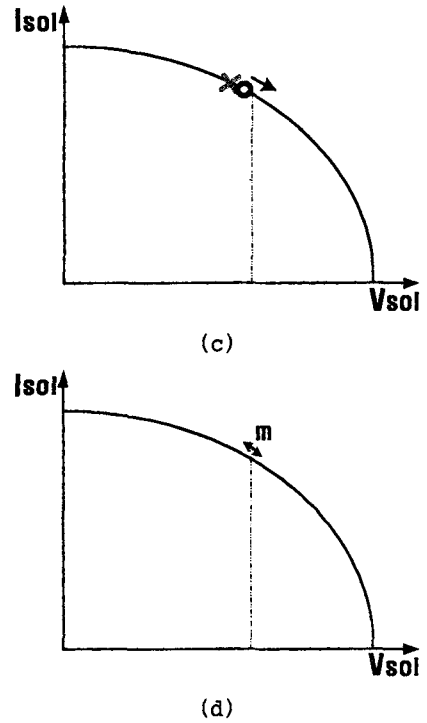
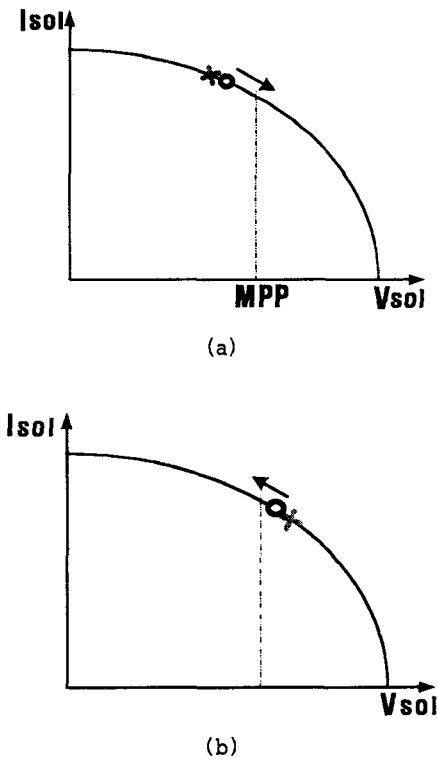


그림 2-1 제안된 최대 전력점 추종 원리  
Fig 2-1 The basic principle of proposed MPPT

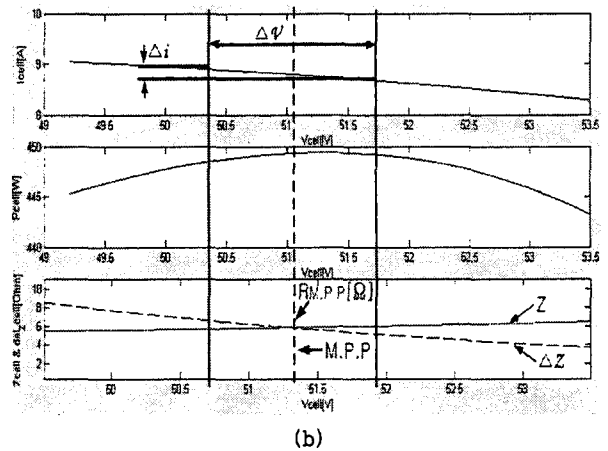
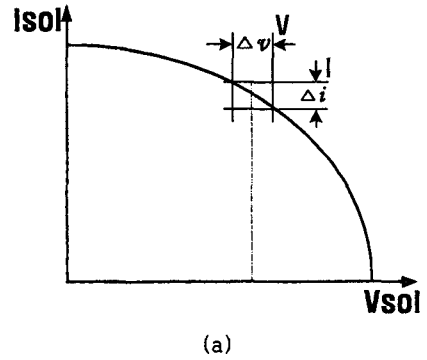


그림 2-2 최대 전력점 추종 시 정적 임피던스와 동적 임피던스  
Fig 2-2 Static and dynamic impedance during MPPT

### 3. 제안된 MPPT 알고리즘과 회로 구현

그림 3-1은 그림 2-1과 2-2 를 기반으로 제안한 최대 전력점 추종 알고리즘의 흐름도를 나타낸다. 그림 2-3에서 알고리즘은 상당히 단순하다는 것을 알 수 있다. 그림 3-2는 제안된 MPPT 알고리즘을 간단한(2개의 전압분배기, sample & hold회로, 비교기, 1개의 플립플롭) 회로로 구현하기 위한 기능 블록도를 나타낸다. 여기서 태양전지 어레이 출력전압과 전류를 1(=100%)로 했을 때 (1-m)배의 전압과 전류가 비교기에 각각 입력에 된다. m는 전압분배기에 의해 구현되며 전압분배기에 의해 분배된 전압은 비교기 입력단의 전압차가 되고 이 비교기의 출력은 R-S 플립플롭의 입력신호가 되며 플립플롭의 출력은 비교기의 입력단에 각각 보수의 상태로 sample and hold 회로에 피드백 된다. 이것은 어레이 전압과 전류의 위치를 각각 제어하기 위함이다. 그리고 플립플롭의 출력은 RC 회로를 통해 컨버터 입력단 전류의 reference가 되고 컨버터 입력단 전류의 차에 의해 error 신호를 발생시킨다. 그 error 신호는 PI 제어를 통해 carrier 신호와 서로 비교하여 컨버터의 출력을 제어하기 위해 PWM을 발생시키게 된다. 듀티의 증가, 감소에 따라 새로운 어레이 전압과 전류가 각각 감소, 증가하게 되고 그 신호는 다시 어레이 출력 전압과 전류 비교기 입력단에 입력되고 sample and hold 회로에 의해 hold된 신호와 비교하게 된다. 이렇게  $mV_{sol}(\Delta v)$ ,  $mI_{sol}(\Delta i)$  값의 범위 내에서 최대 전력점을 추종 한다.

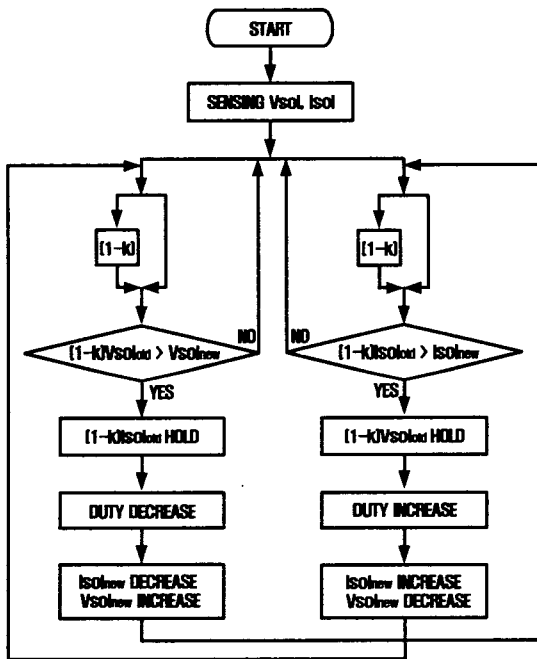


그림 3-1 제안된 최대 전력점 추종 알고리즘 흐름도  
Fig 3-1 Flow chart of proposed MPPT algorithm

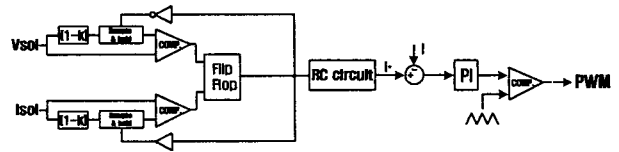


그림 3-2 제안된 하드웨어 MPPT 기능 블록도  
Fig 3-2 Functional block diagram of proposed hardware MPPT

### 4. STEP-DOWN CONVERTER WITH TWO-INDUCTOR

2개의 인덕터를 갖는 스텝-다운 컨버터는 기본적인 inverting  $\hat{Cuk}$  컨버터의 스위칭 Cell을 회전시킴으로서 얻어진다.<sup>[2]</sup> 이러한 스텝-다운 컨버터는 입력전류가 연속이기 때문에 입력전류의 리플을 감소시킬 수 있다. 또한 컨버터 기동 시 입력단에 돌입전류(Inrush current)를 제한할 수 있다.<sup>[3]</sup> 2개의 인덕터를 갖는 스텝-다운 컨버터의 한 주기 스위칭 동안 동작특성을 알아보기 위해 다음과 같은 가정을 한다.

- 스위칭 한 사이클 동안  $V_1$ 은 일정하고,
- $L_1$ 과  $L_2$ 을 흐르는 전류는 일정하며
- $L_1$ 과  $L_2$ 에 걸린 평균 전압은 '0'이다.<sup>[4]</sup>

따라서,  $v_{C1}$ 과  $V_1$ 는 동일하다.

$$M_{DC} = \frac{V_2}{V_1} = D \quad (9)$$

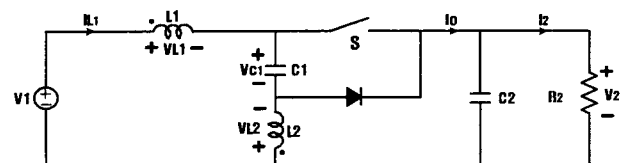
여기서,  $M_{DC}$ 는 DC conversion ratio,  $D$ 는 듀티비

$$k = \frac{L_{12}}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (10)$$

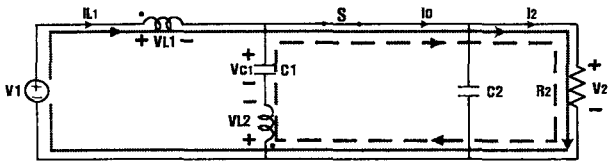
여기서,  $k$ 는 결합계수,  $L_1$ ,  $L_2$ 는 자기 인덕턴스,

$L_{12}$ 는 상호인덕턴스

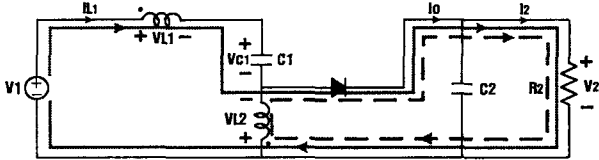
식(9)는 DC 변환비를 나타내며 2개의 인덕터가 서로 coupled inductor로 결합되었을 때 결합계수  $k$ 를 식(10)에 나타내었다.



(a) 초기상태  
(a) Initial condition



(b) 스위치 turn-on  
(b) Switch turn-on



(c) 스위치 turn-off  
(c) Switch turn-off

그림 4-1 스위치 turn on-off 상태에 따른 컨버터 동작  
Fig 4-1 Converter operation as turning on and off the switch

그림 4-1의 (a)는 컨버터의 초기상태를 나타내는데 이때  $V_{C1} = V_1$ ,  $I_{L1} = I_{L2} = 0$  이다. (b)는 스위치 턴-온 시 컨버터 동작을 나타낸다. 여기서  $V_{L1} = V_1 - V_2$ ,  $V_{L2} = V_{C1} - V_2$ ,  $I_2 = I_1 + I_{L2}$  이고, (c)는 스위치 턴-오프 시 컨버터 동작을 나타내며 이때  $V_{L1} = V_1 - V_2 - V_{C1} = -V_2$ ,  $V_{L2} = -V_2$ ,  $I_2 = I_1 + I_{L2}$  가 된다. 그림 4-2은 스위칭 상태에 따른 2개의 인덕터를 갖는 스텝다운 컨버터의 각부 특성파형을 나타낸다.

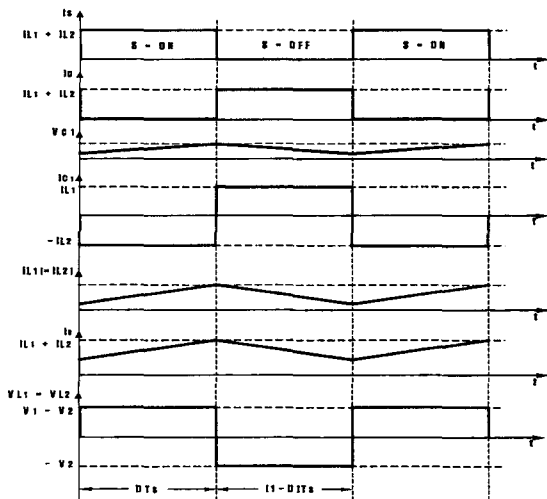


그림 4-2 각부 특성파형

Fig 4-2 Characteristic wave forms of each part

## 5. 시뮬레이션

지금까지 제안한 MPPT 알고리즘을 간단한 회로로 구현하였으며 이를 다음과 같은 조건에 따라 시뮬레이션을 수행하였다. 태양전지 어레이의 수학적 모델링은 식(11)을 사용하였다.<sup>[5]</sup>

$$I_{sol} = I_{sc} \left\{ 1 - \exp\left(k \left( \frac{V_s}{V_{oc}} - 1 \right) \right) \right\} \quad (11)$$

여기서,  $I_{sol}$  : 태양전지 출력전류

$I_{sc}$  : 태양전지 단락전류

$V_{sol}$  : 태양전지 단자전압

$V_{oc}$  : 태양전지 개방전압

$k$  : 곡선상수

그리고 표 1과 같이 450[W] 태양전지 어레이 상세를 적용하였고 표 2와 같이 2개의 인덕터를 갖는 450[W] 스텝다운 컨버터 상세를 적용하였다.

표 1 450[W] 태양전지 어레이 상세

Table 1 Specification of 450[W] solar array

일사량	100[mw/cm <sup>2</sup> ]
온도	25[°C]
최대전력( $P_{max}$ )	450[W]
개방전압( $V_{oc}$ )	63.3[V]
단락전류( $I_{sc}$ )	9.51[A]
최대전력 전압( $V_{mp}$ )	51.3[V]
최대전력 전류( $I_{mp}$ )	8.76[A]

표 2 2개의 인덕터를 갖는 450[W] 스텝-다운 컨버터 상세

Table 2 Specification of 450[W] step-down converter with two-inductor

스위칭 주파수	20[kHz]	
리액턴스	L11	150[uH]
	L22	150[uH]
결합 계수	0.62	
커패시터	Cin	30[uF]
	C1	20[uF]
	C2	300[uF]
부하 저항	5.856[Ω]	

그림 5-1은 온도와 일사량이 일정할 경우 최대 전력점 추종 동작을 나타낸다. 또한 최대 전력점 추종 상수  $m$ 의 변화에 따른 최대 전력점 추종 효율을 구하기 위해 식(11)과 같이 최대 전력점 추종 성능지수(MPPI; Maximum Power Point Performance Index)를 정의하였다.

$$MPPI = \frac{V_{sol} \cdot I_{sol}}{PV\ ARRAY\ MPP} \quad (11)$$

여기서,  $PV\ ARRAY\ MPP$  : 태양전지 어레이 최대 전력점

$V_{sol}$  : 태양전지 어레이 출력전압

$I_{sol}$  : 태양전지 어레이 출력전류

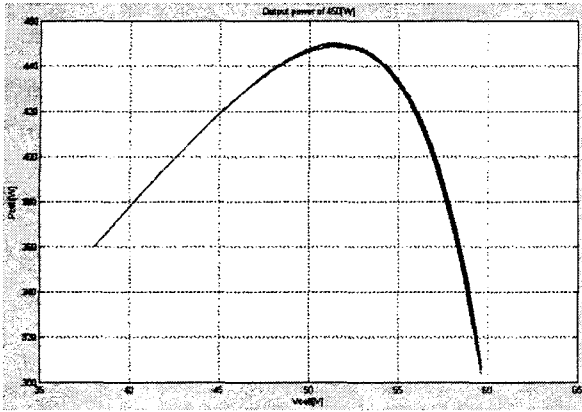


그림 5-1 일사량과 온도 일정할 때 최대 전력점 추종동작  
Fig 5-1 MPPT operation while insolation and temperature is constant

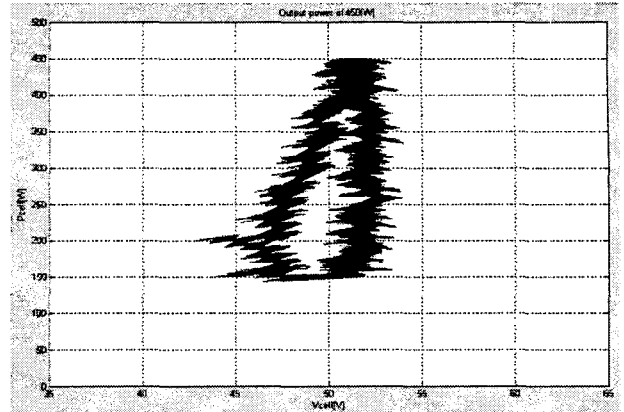


그림 5-3  $I_{sc} = 3.18\sin(4\pi t)$  로 변할 경우 최대 전력점 추종동작  
Fig 5-3 MPPT operation when  $I_{sc}$  is  $3.18\sin(4\pi t)$

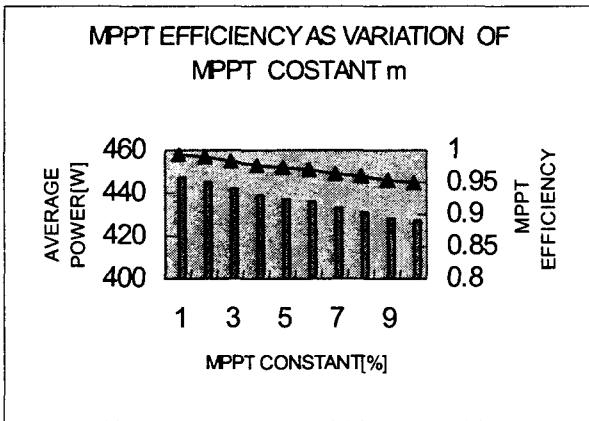


그림 5-2 최대 전력 추종상수 m 변화에 따른 MPPI  
Fig 5-2 MPPI as varying MPPT constant m

그림 5-2는 최대전력 추종상수 m값을 1~10%로 변화시킬 경우 최대 전력점 추종 성능지수를 나타낸다. m값이 커질수록 태양전지 어레이의 평균전력이 감소하고 이에 따라 MPPT 효율이 작아짐을 알 수 있다. 또한 m값이 작을 때가 클 때보다 최대 전력점에 도달하는 시간은 길어지나 최대 전력점에 도달 후 리플이 작아짐을 알 수 있다. 다시 말해서, m값이 클수록 태양전지 발생 효율이 작아지며 안정성면에서 m값이 작을 때 보다 시스템이 불안정함을 알 수 있다. 그림 5-3은 온도와 일사량이 2Hz로 변하여  $I_{sc}$ 가  $3.18\sin(4\pi t)$ 로 일정하게 변할 경우를 가정한 것이다. 그림 5-3에서 온도와 일사량이 변해도 최대 전력점을 잘 추종함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 태양전지 어레이 출력전압과 전류의 위치제어를 통한 최대 전력점 추종 알고리즘을 제안하였고 그것을 간단한 기능을 갖는 최대 전력 추종기로 구현하였으며, 이를 시뮬레이션으로 검증하였다. 시뮬레이션 결과 온도와 일사량이 일정할 경우 최대 전력점 추종 동작을 확인하였다. 그리고 m 값을 1~10%로 가변했을 때 m값이 커질수록 최대 전력점에 도달하는 시간이 짧아지나 최대 전력점에 도달 후 리플이 커짐을 확인 하였다.이것으로 인해 태양전지 발생 효율이 작아지며 시스템이 불안정해짐을 알 수 있었다. 마지막으로 일사량과 온도가 2Hz변할 경우를 가정해서  $I_{sc}$ 가  $3.18\sin(4\pi t)$ 로 일정하게 변할 때 최대 전력점을 잘 추종함을 확인하였다. 향후 이러한 시스템을 실제 하드웨어로 구현하여 위 시뮬레이션 결과와 비교 분석해야 하겠다.

이 논문은 (주) 한국항공우주연구소의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

#### 참 고 문 헌

[1] 이상용, "계통연계형 태양광 발전시스템을 위한 새로운 최대 전력점 추적 알고리즘", 건국대학교 공학석사 학위논문, 2000.  
[2],[3] Zhe Zhang, "A High Efficiency 1.8kW Battery Equalizer" IEEE 1993, pp.221-225  
[4] V. Grigore, "A Step-Down Converter with Low Ripple Input Current for Power Factor Correction" IEE 2000, pp.188-189  
[5] 김홍성, "3상 계통연계 태양광 발전시스템의 제어기 설계" 건국대학교 공학박사 학위논문, 1998