

## 배터리 내장형 초소형 태양광 장치용 PV MPPT 및 충방전 제어 알고리즘

### The PV MPPT & Charge and Discharge Algorithm for the Battery Included Solar Cell Applications

김승민\* · 박봉희\*\* · 최주엽\*\*† · 최익\*\*\* · 이상철\*\*\*\* · 이동하\*\*\*\*  
Kim Seung-Min\*, Chio Ju-Yeop\*\*†, Choy Ick\*\*\*, Lee Sang-Chul\*\*\*\*,  
Lae Dong-Ha\*\*\*\* and Park Bong-Hee\*\*

(Submit date : 2013. 8. 13., Judgment date : 2013. 8. 20., Publication decide date : 2013. 10. 10.)

**Abstract :** To increase the efficiency of the photovoltaic, almost photovoltaic appliances are controlled by Maximum Power Point Tracking(MPPT). Existing most of the PV MPPT techniques have used power which multiplies sensed output current and voltage of the solar cell. However, these algorithms are unnecessarily complicated and too expensive for small and compact system.

The other hand, the proposed MPPT technique is only one sensing of the MPPT converter's output current, so there is no need to insert another sensors of battery side. Therefore, this algorithm is simpler compared to the traditional approach and is suitable for low power solar system.

Further, the novel proper charge/discharge algorithm for the battery with PV MPPT is developed. In this algorithm, there is CC battery charge mode and load discharge mode of the PV cell & battery dual. Also we design current control to regulate allowable current during the battery charging. The proposed algorithm will be applicable to battery included solar cell applications like solar lantern and solar remote control car. Finally, the proposed method has been verified with computer simulation.

**Key Words :** 태양광 최대전력 추종제어(PV MPPT), 배터리 충방전 제어(Charge and discharge control for the battery), 컨버터 모델링(Converter Modeling), 배터리 내장형 태양광 장치(Battery included solar cell application)

\*\*† 최주엽(교신저자) : 광운대학교 전기공학과

E-mail : juyeop@kw.ac.kr, Tel : 010-3794-6407

\*김승민 : (주)다원시스, 광운대학교 임베디드SW공학과

\*\*\*최익 : 광운대학교 제어공학과

\*\*박봉희 : 광운대학교 전기공학과

\*\*\*\*이상철, \*\*\*\*이동하 : 대구경북과학기술원

\*\*† Chio Ju-Yeop(corresponding author) : Department of Electrical Engineering, Kwangwoon University.

E-mail : juyeop@kw.ac.kr, Tel : 010-3794-6407

\*Kim Seung-Min : Dawonsys Co. Ltd., Department of Embedded SW Engineering, Kwangwoon University

\*\*\*Choy Ick : Department of Control Engineering, Kwangwoon University

## 기 호 설 명

- $V_{out}$  : The output DC voltage [V]
- $I_{out}$  : The output DC current [A]
- $V_{in}$  : The input DC voltage [V]
- $I_{in}$  : The input DC current [A]
- $I_{pv}$  : Photovoltaic cell output current[A]
- $G_{id}$  : Current control transfer function
- $G_{vd}$  : Voltage control transfer function

## 1. 서 론

태양광 발전 설비에서 태양광 셀의 출력 전력을 최대로 부하에 전달하기 위해 태양광 최대전력추종제어를 한다. 태양광 시스템에서 태양광 셀은 온도와 일사량에 따라 태양광 셀의 단락 전류와 개방 전압의 특성이 변화하게 되며 태양광 셀의 전력 활용의 효율을 극대화 할 수 있도록 태양광 최대전력추종제어를 하게 된다.

일반적인 태양광 최대전력 추종제어는 태양광 셀의 전압과 전류의 곱인 전력 값을 비교하여 최대전력추종제어를 한다. 이 경우 태양광 셀의 출력전류와 전압을 검출하여 전력을 계산하여야 한다.<sup>[1]</sup>

본 논문에서는 DC/DC 컨버터의 출력 전류만을 이용하여 태양광 셀의 최대전력 추종제어를 하여 센서(Sensor)의 개수를 줄이고 부하로 나가는 출력을 제어할 수 있는 저비용의 태양광 최대전력추종제어를 소개한다.<sup>[2]</sup> 또한 본 알고리즘을 이용하여 배터리 내장형의 초소형 태양광 장치에 적용 가능한 충·방전 제어 알고리즘을 제안한다.

## 2. 컨버터 모델링 및 최대전력 추종제어의 수식적 분석

제안하는 컨버터의 출력 파라미터를 이용한 제어를 수식적으로 검증하기 위해 MPPT 컨

버터를 그림 3와 같이 DC 변압기 회로로 모델링하였다.<sup>[2]</sup>

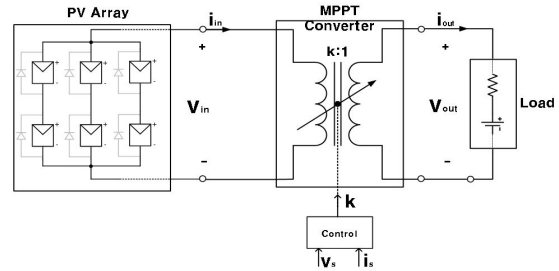


Figure 1. MPPT mathematical analysis by converter model

MPPT 컨버터의 DC변압기 모델 특성 식은 식(1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{out} \\ i_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k^{-1} & 0 \\ 0 & k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{in} \\ i_{in} \end{bmatrix} \quad (1)$$

변압기의 변환 비  $k$ 는 컨버터를 동작시키는 듀티비(duty ratio)  $d$ 에 의해 제어된다. 그리고 태양광 MPPT 제어의 부하는 선형적인 특성을 가지므로 식(2)와 같이 표현되고 변환비  $k$ 에 의해 입력 전압식도 다음과 같이 결정된다.

$$v_{out} = E + i_{out}R, \quad v_{in} = kE + i_{in}k^2R \quad (2)$$

이로부터 컨버터의 입력 전력은 식(3)와 같이 나타낼 수 있다.

$$p_{in} = v_{in} \left( \frac{v_{in} - kE}{k^2R} \right) = \frac{v_{in}^2 - kEv_{in}}{k^2R} \quad (3)$$

위 식을  $k$ 에 관한 식으로 정리하면 식(4)와 같다. 또한 컨버터의 입력과 출력의 전력은 같으므로 태양광 셀의 출력에 따른 컨버터의 출력 전류와 전압의 관계를 구하면 식(5), 식(6)와 같다.

$$k = \frac{\sqrt{4Rp_{in} + E^2} - E}{2Ri_{in}} \quad (4)$$

$$i_{out} = \frac{\sqrt{4Rp_{out} + E^2} - E}{2R} \quad (5)$$

$$v_{out} = i_{out}R + E = \frac{\sqrt{4Rp_{out} + E^2} + E}{2} \quad (6)$$

다. 태양광 시스템의 부하는 일반적으로 식(2)와 같은 전압원 특성을 가지므로  $i_{out}$ 과  $v_{out}$ 에 대한 각각의 Sensitivity는 식(7)와 같은 수식으로 표현된다.

$$S_{v_{out}}^{P_{out}} = \frac{\partial p_{out}}{\partial v_{out}} \left( \frac{v_{out}}{p_{out}} \right) = \frac{E + 2Ri_{out}}{E + Ri_{out}},$$

$$S_{i_{out}}^{P_{out}} = \frac{\partial p_{out}}{\partial i_{out}} \left( \frac{i_{out}}{p_{out}} \right) = \frac{2v_{out} - E}{v_{out} - E}$$

$$\therefore S_{v_{out}}^{P_{out}} > S_{i_{out}}^{P_{out}}$$

수식 7을 통해 전력에 대한 출력 전압의 Sensitivity보다 전류의 Sensitivity가 더 작은 것을 알 수 있다. 이는 출력 전류를 통해 전력을 제어하는 것이 출력 전압보다 상대적으로 오차가 더 적어 정확하다는 것을 나타낸다.

### 3. 단일 전류 센서를 이용한 태양광 최대 전력 추종제어 알고리즘 및 전류 제어기 설계

그림3은 전압원 특성을 가지는 선형부하에서 태양광 최대전력 추종제어를 할 때 DC-DC 컨버터의 출력 전류를 이용하여 최대전력 추종 제어하는 알고리즘을 나타낸다.

현재 전류의 값과 이전 주기의 전류 값을 비교하여 증가하면 컨버터의 듀티비(Duty ratio)  $d$ 를 일정 증분 증가시켜주고 반대로 감소하면 일정 증분 감소시켜 주면 태양광 최대 전력을 추종하도록 한다. 전류는 전력의 변화에 빠르게 추종할 수 있으며 듀티비(Duty ratio)의 크기를 직접 제어하여 알고리즘을 간략하게 만들었다.

또한 전류가 과출력되어 부하의 허용 가능 전류를 넘어섰을 때는 일정 전류제어를 하여 안정적으로 배터리를 충전할 수 있도록 제어한다.

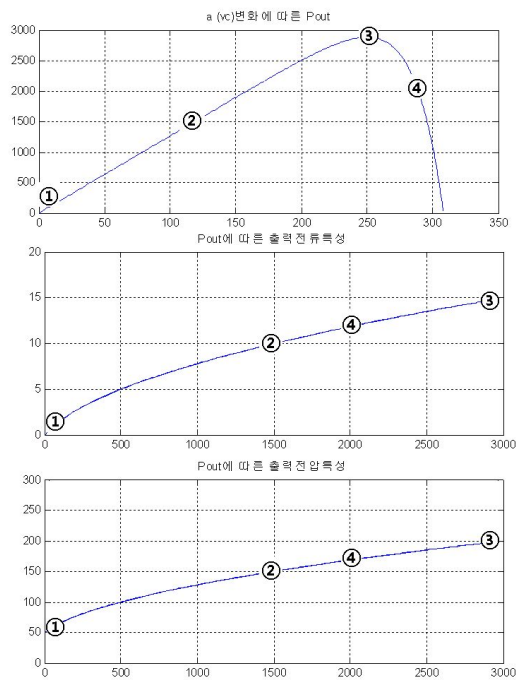


Figure 2. The controllable parameters characteristics according to the PV output power

그림 4와 같이 컨버터의 출력 전력이 증가함에 따라  $i_{out}$ 과  $v_{out}$ 도 선형적으로 증가하며 컨버터의 출력 전력의 최대값은 입력 전력의 최대값(즉, 태양광 셀의 최대출력 값)과 등가적이므로 컨버터의 출력 전류(또는 전압)값으로 MPPT 제어 가능하다.

한편, 두 개의 출력 파라미터 중 어떤 것을 선택하느냐에 따라 최대전력 추종에 있어 큰 차이를 보일 수 있으며, 이를 Sensitivity라 한

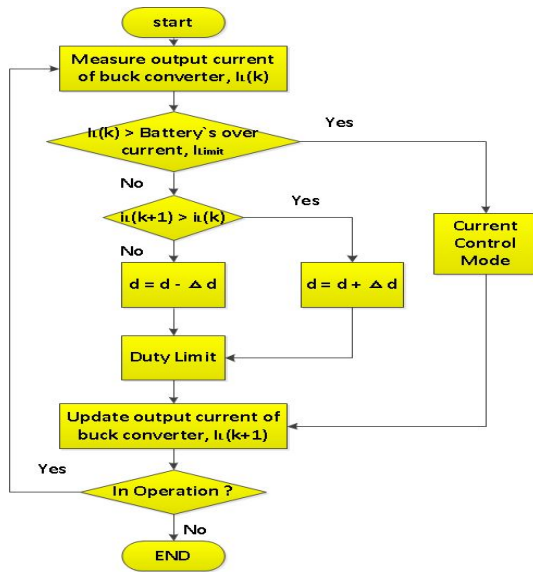


Figure 3. Flow chart of the MPPT control algorithm

### 3.1 태양광 셀과 배터리 특성을 고려한 전류 제어기 설계

태양광 셀의 출력 특성 곡선으로부터 동작 점 ( $V_{MPP}$ ,  $I_{MPP}$ )에서 선형화 시킬 수 있으며 이는 그림 4로 부터 식(8)과 같이 구해진다.

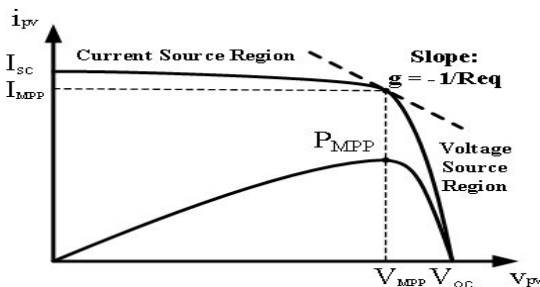


Figure 4. I-V characteristic curve of PV cell

$$i_{pv} = (-g V_{MPP} + I_{MPP}) + g v_{pv}$$

$$= g(v_{pv} - V_{MPP}) + I_{MPP}$$

$$\text{where, } g = \left. \frac{\partial i_{pv}}{\partial v_{pv}} \right|_{(V,I)} \quad (8)$$

태양광 셀의 출력 특성 식으로부터  $g$ 는 식

(9)와 같이 나타낼 수 있으며, 선형화된 모델은 전압원과 저항의 직렬회로로 구성된다. 이를 통해 태양광 셀과 배터리의 특성을 고려한 등가회로 모델은 그림 5와 같다.

$$g = \left. \frac{\partial i_{pv}}{\partial v_{pv}} \right|_{(V,I)} = - \left( R_s + \frac{1}{\frac{I_s}{\eta V_T} e^{\frac{V+R_s I}{\eta V_T}} + \frac{1}{R_p}} \right)^{-1} \quad (9)$$

where,  $R_{eq} = -1/g$ ,  $V_{eq} = V - I/g$

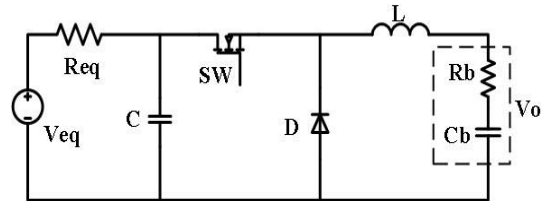


Figure 5. circuit model considered with PV cell and battery

그림 5에 대한 전류 제어전달함수는 식(10)과 같으며 이에 대한 페루프 전달함수의 보드 선도는 그림 6과 같다.

$$G_{id}(s) = \frac{sC_b[V(1+sCR_{eq}) - I_LR_{eq}D]}{(s^2LC_b + sC_bR_b + 1)(sCR_{eq} + 1) + sD^2R_{eq}C_b} \quad (10)$$

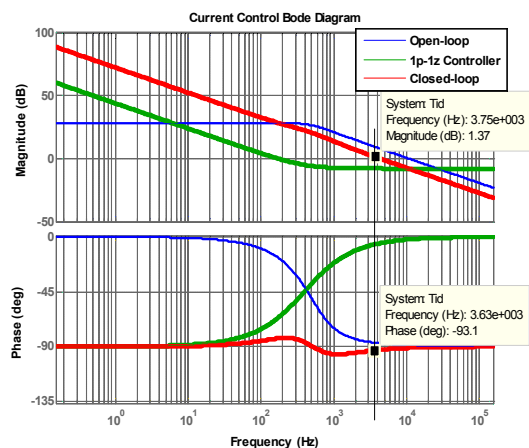


Figure 6. Closed loop transfer function with current contro

#### 4. 제안하는 PV MPPT 배터리 충전 및 모터 구동 시스템

그림 7는 태양광 최대전력 추종제어와 배터리 충·방전 제어 가능한 모터 시스템이다.

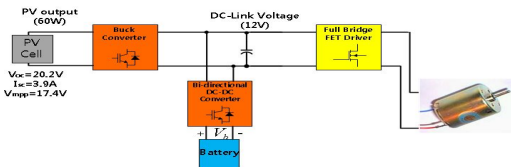


Figure 7. PV battery charger & motor control diagram

제안하는 시스템의 동작은 다음과 같이 세 가지 모드를 가진다.

##### ① 태양광 셀에 의한 배터리 충전모드

PV 전력이 부하의 정격전력보다 낮고 배터리가 방전되어 있을 경우에 PV 출력으로 배터리를 충전하는 모드이다. 이 모드에는 백 컨버터는 DC-link 전압제어를 하고, 양방향 DC-DC 컨버터는 백 컨버터로 동작하며 배터리 충전 제어를 한다.

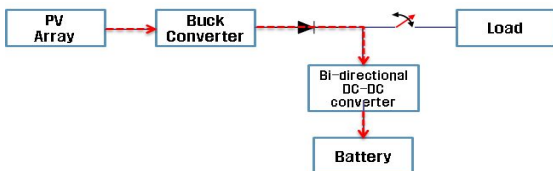


Figure 8. PV battery charge mode

##### ② 배터리 방전 모드

해가 졌을 경우 태양광 셀에서 발전을 하지 못하므로 PV 출력은 없고 배터리 출력만을 이용하여 모터를 구동시키는 모드이다.

##### ③ 태양광 셀과 배터리의 이중 출력 모드

PV와 배터리 모두 출력을 낼 수 있을 경우에 모터에 최대로 전력을 공급하여 구동시키는 모드이다. 이를 통

해 가속 구간에서 모터의 최대출력을 낼 수 있도록 한다.

이 모드에는 양방향 DC-DC 컨버터는 Boost 컨버터로 동작하며 DC-link 전압제어를 하고 Buck 컨버터는 MPPT 제어를 한다. 이때, Boost 컨버터의 제어전달함수는 식(11)과 같고 페루프 전달함수의 보드선도는 그림 11과 같다.

$$G_{vd}(s) = \frac{G_{do}\omega_n^2 \left( \frac{1}{\omega_c\omega_c} s^2 + \frac{\omega_e - \omega_c}{\omega_e\omega_c} s + 1 \right)}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (11)$$

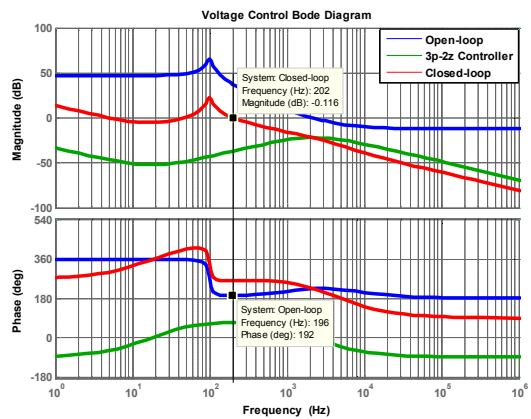


Figure 9. DC-link voltage control of the boost converter

#### 5. 시뮬레이션

그림 10는 앞서 설계한 MPPT 알고리즘의 추종 특성을 확인하기 위한 PSIM 시뮬레이션 회로이다.

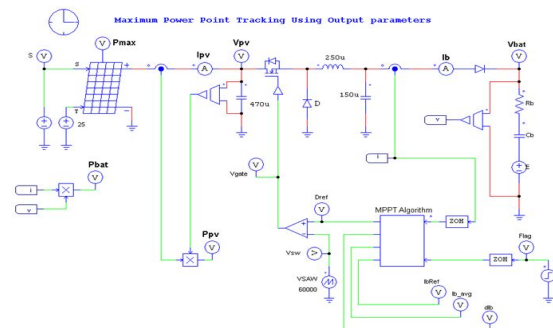


Figure 10. The simulation diagram for the PV MPPT

시뮬레이션 결과, 그림 11의 첫 번째 파형에서 보듯이 태양광 셀의 최대전력점 추종제어를 하여 부하에 최대 전력 전달된다. 이 과정에서 현재와 이전 주기의 전류 값을 비교하여 듀티비를 증감시키게 되며 이것을 두 번째 파형에서 보인다. 이후 전류 제어 모드로 변경 되면 출력되는 부하 전류를 일정하게 제어하게 되는데 네 번째 파형을 통해 확인할 수 있다.

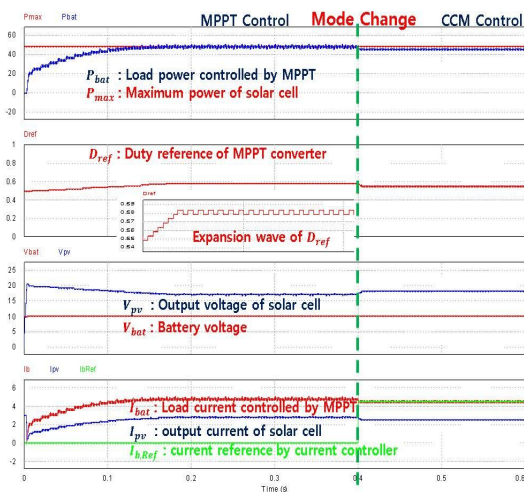


Figure 11. The simulation result for the PV MPPT

그림 12는 PV MPPT와 배터리의 충·방전 제어를 통합한 시뮬레이션 회로이다.

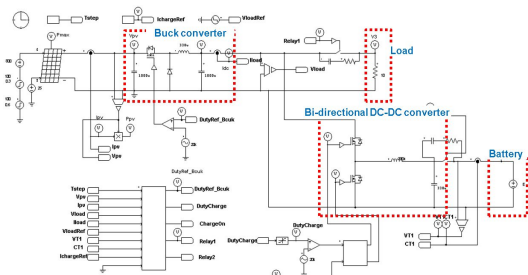


Fig. 12. The simulation circuit for the charge & discharge control of the PV cell & battery

그림 13는 제안한 태양광 셀과 배터리의 충·

방전 제어에서 배터리 충전 모드 시 파형이다. 배터리 충전 시에는 벅 컨버터는 DC-link 전압 제어를 하게 되고 양방향 DC-DC 컨버터는 배터리를 충전을 위해 전류제어를 한다.

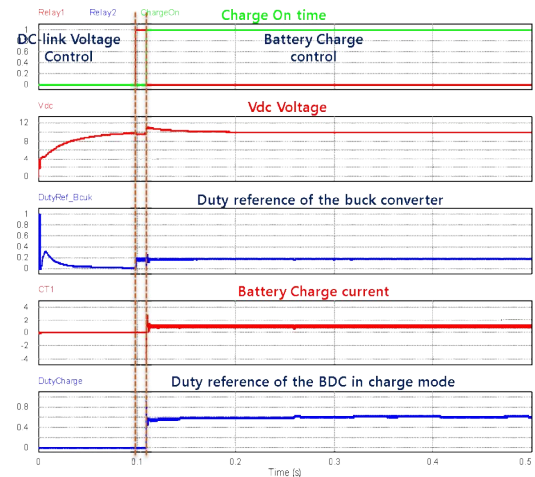


Fig. 13. The simulation result of the PV battery charge mode

그림 14는 태양광 셀과 배터리의 방전 모드 시 파형이다. 배터리 방전시에는 양방향 DC-DC 컨버터는 부스트 컨버터로 동작하고 DC-link 전압 제어를 하게 된다.

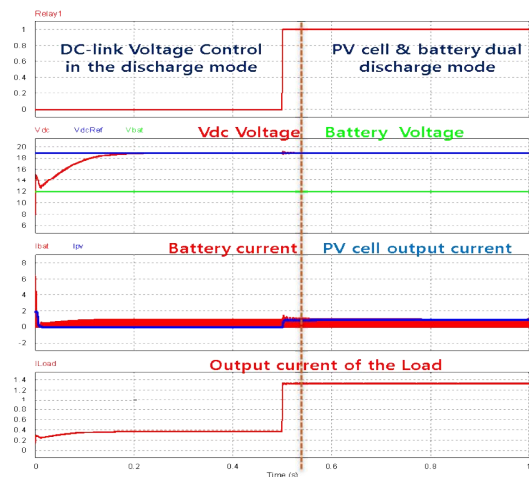


Fig. 14. The simulation result of the PV cell & battery dual discharge mode

부하는 배터리와 태양광 셀로부터 동시에 전류를 공급받아 모터구동에 충분한 전류를 공급 받을 수 있다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 태양광 최대전력 추종제어를 위해 DC/DC 컨버터의 출력 전류를 이용하여 태양광 셀의 최대 전력 점을 추종하도록 하는 비교적 간단하고 초소형 태양광 장치에 적합한 알고리즘을 제시하였다. 따라서 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 일반적인 태양광 MPPT는 태양광 셀의 출력 전압과 출력 전류를 측정하고 배터리 충방전 제어를 위해서 배터리 측의 출력 전압과 전류도 측정해야 하지만 본 논문은 태양광 셀의 출력 전압과 출력 전류를 측정하지 않고도 컨버터의 출력 전류로 MPPT를 함으로써 센서의 수를 줄이고 전체 PCS의 면적도 줄일 수 있다는 데 있다.
- (2) 또한 이를 이용하여 배터리 내장형 초소형 태양광 장치에 적합한 배터리 충·방전 회로와 제어기를 설계하였고 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 향후에는 실험을 통해 구현할 계획이다.

## 후 기

본 연구는 교육과학기술부 대구경북과학기술원 일반사업(12-BD-0101)에 의해 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. Trishan ESRAM, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques,"

IEEE Transactions on Energy conversion, vol.22 No.2. June 2007

2. D. Shmiovitz, "On the control of photovoltaic maximum power point tracker via output parameters," IEEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol 152, No2, March 2005