

# 태양 전지의 전압, 전류 동작점 제어를 이용한 아날로그 MPPT 설계

(The Design of the analog MPPT by the control of  
the operating point of a solar array voltage and current)

박희성\* · 박성우 · 장진백 · 장성수

(Hee-Sung Park · Sung-Woo Park · Jin-Beak Jang · Sung-Soo Jang)

한국항공우주연구원

## Abstract

The SAR(Solar Array Regulator) of KOMPSAT(KOrea Multi Purpose SATellite)-1, 2 regulates a photovoltaic power according to the duty ratio commands of the ECU. But the ECU has so many other jobs that it can not calculate the solar array condition immediately. It means the SAR cannot always generate the maximum power of a photovoltaic.

Nowadays, the commercial photovoltaic systems are using a controller operated by digital processing. But the usage for satellite is not adaptable. It is not easy to find the processor of the space grade and the price is expensive.

So in this paper, the simple analog MPPT(Maximum Power Point Tracking) algorithm is proposed for the small satellite in LEO. This algorithm does not need any calculation of power by multiplication of voltage and current and a measurement of the solar array temperature. It is consist of only two sample and hold circuits, two comparators, a flip-flop, and an integrator. The proposed MPPT algorithm is verified by the simulation and experimental.

## 1. 서 론

위성의 주 임무를 수행하는 탑재체는 점진적으로 고정밀화 되고 또한 많은 임무를 수행하도록 요구된다. 이는 위성체의 전력 관련 전장품의 대용량화를 요구하며 이러한 대용량화는 전장품의 크기 및 무게의 증가를 초래한다. 하지만 위성체에서 전장품의 크기와 무게는 위성 개발에서 아주 민감한 사항이다. 따라서 한정된 용량의 태양 전지에서 최대의 전력을 취하는 것은 위성 개발에 있어서 필수 불가결한 요구 조건이다.

태양 전지의 최대 전력을 취하기 위한 방법으로 태양 전지의 최대 전력 점을 추적하는 MPPT (Maximum Power Point Tracking) 방식을 사용하는데, 최근의 상용 제품에서는 프로세서의 발달로 주로 프로그램을 이용한 방법을 사용한다. 하지만 위성에서 사용될 MPPT는 우주 환경에서 동작하여야 하므로 프로세서의 선택 및 가격적인 측면에서 제한이 따른다. 따라서 본 연구에서는 아날로그 방식의 MPPT를 이용하여 설계하였으며, 시뮬레이션과 시험을 통하여 제안한 아날로그

MPPT 방식의 사용 가능성을 검증하였다.

## 2. MPPT 동작 원리

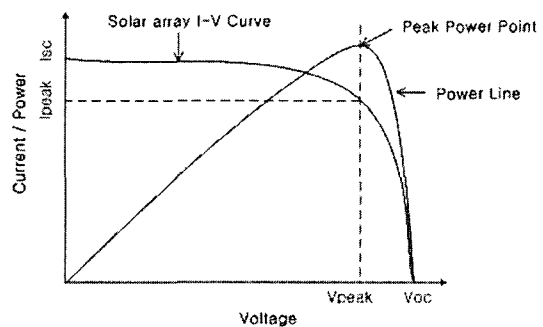


그림 1. 태양 전지의 전압-전류 특성 곡선  
Fig. 1. The V-I Curve of Solay Array

그림 1에 보여지는 태양전지의 P-V 곡선을 보면 전력이 같은 두 지점이 최대 전력점을 사이에 두고 양쪽에 존재하게 된다. 이때 두 동작 전압의 관계에 일정한

비  $k$  ( $k \leq 1$ )의 관계를 주면 전류에서도 역시  $k$  배의 관계를 얻을 수 있다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{정상 상태에서 } P_1 &= P_2 \text{ 일때,} \\ P_1 &= I_1 \cdot V_1, P_2 = I_2 \cdot V_2 \\ \text{만일, } V_1 &= k \cdot V_2 \text{ 면} \\ I_2 &= k \cdot I_1 \end{aligned} \quad (1)$$

이때  $k$  값이 '1'에 가까워 진다면,  $P_1 = P_2 \approx P_{\text{peak}}$ 이 성립되어 두 지점이 최대 전력점 부근에서 동작한다. 따라서 최대 전력점 추적 제어가 항상 이 두 지점에서 동작하도록 전압 지령치를 준다면, 이 시스템은 최대 전력을 추적한다고 볼 수 있다.

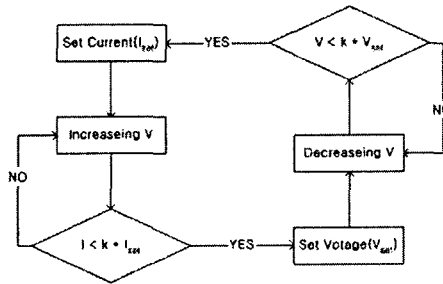


그림 2. MPPT 제어기법의 동작 순서도  
Fig. 2. The Flow of MPPT Algorithm

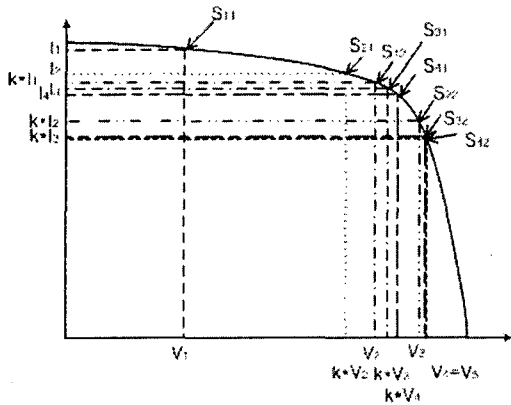


그림 3. 전압-전류 곡선에서의 최대 전력점  
Fig. 3. Maximum Power Point on the V-I Curve

그림 2는 제안된 MPPT 제어 기법의 동작 순서도이다. 우선 그림 2의 순서도에서 "Set I"부터 시작하여 "Set V"까지의 동작은 그림 3에서 보면 동작점이 'S11'에서 'S12'로 이동하는 과정이 되며, 이 과정은 초기 동작점에서의 전류( $I_1$ )와 그 전류의  $k$  배의 비교를 통해

판별식을 만족할 때까지 전압을 계속 증가시키게 된다. 그리고 판별식을 만족하면 새로운 동작점에서 다시 그림 2의 "Set V"에서 "Set I"까지의 동작을 수행한다. 이는 그림 3의 'S12'에서 'S21'로 이동을 나타낸다. 이 과정에서는 현 동작점에서의 전압( $V_2$ )과 그 전압의  $k$  배의 비교를 통해 판별식을 만족할 때까지 전압을 감소시키게 된다. 그리고 판별식을 만족하게 되면 새로운 동작점을 만들어 내고, 그때의 전류를 "Set"하여 다시 처음 과정을 반복하게 된다. 요약하면 처음 과정은 전류의  $k$  배를 만족하도록 찾아가는 것이며, 두 번째 과정은 전압의  $k$  배를 만족하도록 찾아가는 과정이다. 따라서 이 두 과정의 순차적인 반복을 통해 각 과정이 동시에 만족되는 두 동작점 사이에서 안정하게 된다. 각 동작점에 대한 정보는 표 1과 같다.

표 1. 태양 전지에서 최대 동작점과 전압, 전류

Table 1. Maximum Power Point and Current and Voltage of Solar Array

| 위치  | S <sub>11</sub>                     | S <sub>12</sub>                     | S <sub>21</sub>                     | S <sub>22</sub>                     |
|-----|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 동작점 | V <sub>1</sub> , I <sub>1</sub>     | V <sub>2</sub> , k · I <sub>1</sub> | k · V <sub>2</sub> , I <sub>2</sub> | V <sub>3</sub> , k · I <sub>3</sub> |
| 위치  | S <sub>31</sub>                     | S <sub>32</sub>                     | S <sub>41</sub>                     | S <sub>42</sub>                     |
| 동작점 | k · V <sub>3</sub> , I <sub>3</sub> | V <sub>4</sub> , k · I <sub>3</sub> | k · V <sub>4</sub> , I <sub>4</sub> | V <sub>5</sub> , k · I <sub>4</sub> |

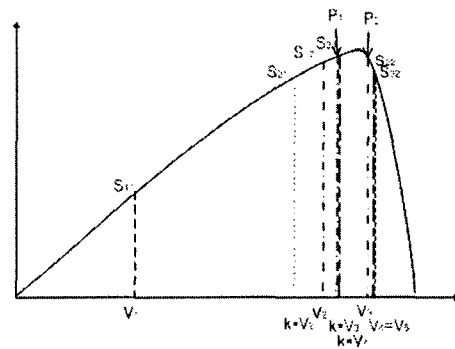


그림 4. 전력-전압 곡선에서의 최대 전력점  
Fig. 4. Maximum Power Point on the P-V Curve

그림 4는 전력-전압 곡선상에 제안한 알고리즘에서 최대 전력의 동작점 이동경로를 보여준다.

이 알고리즘의 원리는 다음과 같이 태양 전지의 V-I 곡선이 최대 전력점의 왼쪽에 있을 때는  $\Delta I/I_{\text{ppt}} > \Delta V/V_{\text{ppt}}$  특성이 있고, 오른쪽에 있을 때는  $\Delta I/I_{\text{ppt}} < \Delta V/V_{\text{ppt}}$  특성이 있음을 이용한 것이다(단,  $\Delta I = I - k \cdot I$ ,  $\Delta V = V - k \cdot V$ ). 또한 그림 4의 P-V 곡선에서 보면 한 동작점은 최대 전력점을 지나 P-V 곡선의 반대쪽 경사의 같은 전력이 되는 동작점에 수렴하게 되

는 것을 알 수 있다. 즉 위의 알고리즘을 만족하는 두 동작점에 사이에 최대 전력점이 오게 되는데 이는 아래 식 (3)을 통해서도 확인할 수 있다. 일반적으로 태양 전지의 최대 전력점에서는 식 (2)을 만족한다. 그리고 2차 보간법과 같이 두 점의 중심에서의 미분 기울기를 두 점 사이의 선형기울기로 근사화 할 수 있다. 이 때  $V_1 = k \cdot V_2$  으로 동작한다면 식 (3)의 관계를 얻을 수 있다.

$$\frac{dV}{dI} = -\frac{V}{I} \quad (2)$$

$$\frac{V_1}{I_1} < \frac{V_1}{kI_1} = -\frac{V_1 - V_2}{I_1 - I_2} = \frac{kV_2}{I_2} < \frac{V_2}{I_2} \quad (3)$$

그리고 정상 상태에 이르게 되면, 식 (1)과 같이  $P_1 = I_1 \cdot V_1 = P_2 = I_2 \cdot V_2$  가 되어, 두 동작점 사이에 최대 전력점이 위치함을 확인 할 수 있다. 식 (3)에서 k값이 '1'에 수렴하면,

$$\frac{V_1}{I_1} = -\frac{V_1 - V_2}{I_1 - I_2} = \frac{V_2}{I_2} \quad (4)$$

을 만족한다. 이는 결국 두 동작점이 모두 최대 동작점에 있음을 의미한다. 따라서 k 값이 '1'에 가까울수록 두 동작점은 최대 동작점에 수렴한다는 것을 알 수 있고, 결국 k 값이 MPPT 제어의 정확성과 관련이 있음을 확인 할 수 있다. 또한 k 값에 따라 정상 상태에 도달하는 횟수가 결정되는데, k 값이 크면 순환 횟수가 더 증가하고, k가 작으면 순환 횟수는 줄어들게 된다. 이는 결국 k 값이 추적 속도와 관련 있음을 나타낸다.

### 3. 시뮬레이션 및 실험결과

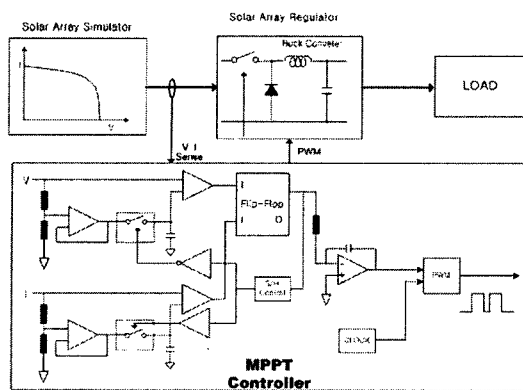


그림 5. MPPT 제어기 블럭도  
Fig. 5. Block Diagram of MPPT Controller

그림 5는 시험을 위한 MPPT의 구성도를 보여준다. 제안된 아날로그 MPPT는 태양 전지의 전압, 전류를 측정하여 샘플링 전의 값과 비교하는 2개의 Sample & Hold 회로와 2개의 비교기, 하나의 Flip-Flop, 그리고 변화된 출력 값의 급격한 변화를 방지하기 위한 1개의 적분기로 구성되어 있으며, 태양 전지의 변환은 다목적 실용위성 1호, 2호에 사용된 Buck-Converter 타입의 SAR(Solar Array Regulator)가 수행하게 된다. SAR의 스위칭 주파수는 100kHz이다.

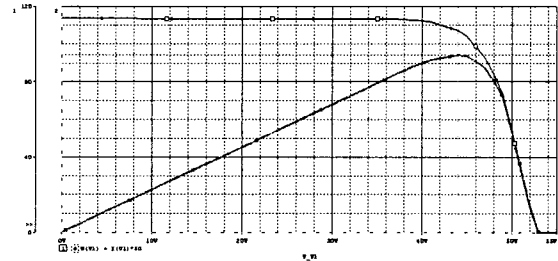


그림 6. 태양 전지의 전압-전류, 전력-전압 곡선  
Fig. 6. V-I, and P-V Curve of the solar array

그림 6은 MPPT 시뮬레이션을 위하여 태양 전지를 모델링한 결과를 보여준다. 그림에서 보여지는 바와 같이  $I_{sc} = 2.272[A]$ ,  $I_{peak} = 2.146[A]$ ,  $V_{oc} = 50[V]$ ,  $V_{peak} = 44[V]$  로 설정하였으며, 최대 전력점에서의 전력은 약 94[W] 이다.

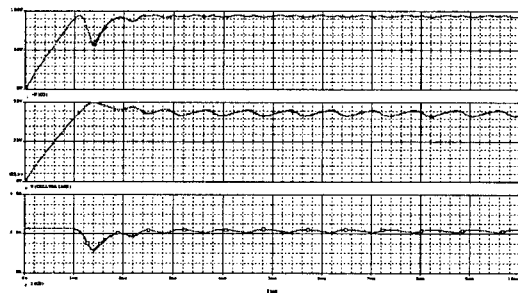


그림 7. 태양 전지의 전력, 전압, 전류 응답 특성  
Fig. 7. Power, Voltage and Current response of the solar array

그림 7은 초기 MPPT 구동에서 정상상태에 도달할 때의 특성을 보여준다. 그림 8은 MPPT의 정상 상태 특성을 보여준다. 본 시뮬레이션에서 k는 0.98로 선정하여 MPPT의 자체 진동 폭을 최소화 하고자 하였다.

그림 8에서 나타난 것처럼 출력전력 94[W], 전압 44[V], 전류 2.1[A]로 그림 6에서 근사화한 태양 전지의 최대 출력 동작점에서 동작함을 볼 수 있다. 제안한 MPPT 방식은 전술한 바와 같이 P-V 곡선에서 출력

전력이 최대점을 기준으로 왼쪽과 오른쪽으로 미세 진동을 한다. 이를 그림 8의 전력 파형으로 확인할 수 있다. 제안한 MPPT의 원리상 이와 같은 리플은 반드시 발생하지만, 리플의 Peak-to-Peak가 출력전력의 2% 이내로써 미세하다.

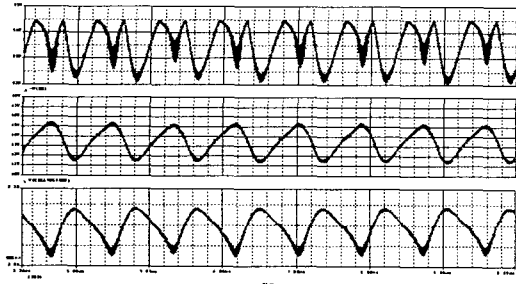


그림 8. 정상 상태에서의 전력, 전압, 전류 응답 특성  
Fig. 8. Power, Voltage and Current response of Solar Array in the steady state

시험을 위하여 Solay Array 시뮬레이터를 이용하였으며, 부하의 변동시와 V-I 특성곡선 변경시의 최대 전력점 추적 파형을 그림 9와 그림 10에 각각 보여준다.

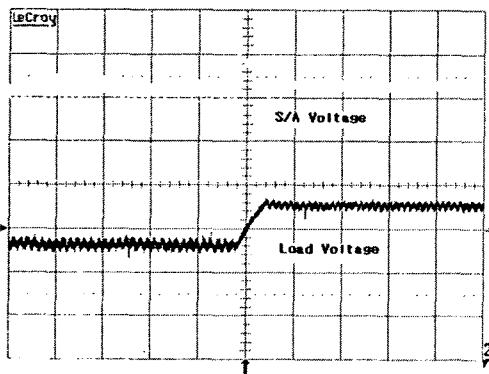


그림 9. 부하 변동시의 S/A 전압, 부하전압 응답 특성  
Fig. 9. S/A voltage and load voltage when the load is changed

그림 9는 부하의 변동시 태양 전지의 전압의 변화와 부하 전압의 변화를 보여준다. 위 파형에서 부하의 변동시에도 태양 전지의 최대 전압 위치에서 동작이 유지됨을 볼 수 있다.

그림 10은 동일 부하에서 S/A의 최대 전류 값과 단락 전류 값을 변경시 S/A 전압, S/A 전류의 특성을 보여준다. 이 결과 파형에서 V-I 특성곡선의 전류 값을 변경시에도 S/A의 최대 전압 값은 유지됨으로써 최대

전력을 생산함을 볼 수 있다.

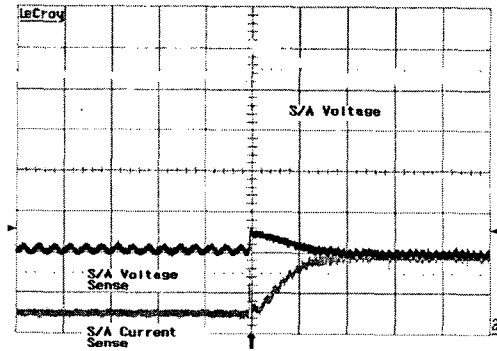


그림 10. V-I Curve 변경시 S/A 전압, S/A 전류 응답 특성  
Fig. 10. S/A voltage and S/A Current when V-I curve is changed

#### 4. 결론

현재 다목적 실용위성 1호와 2호기에서 사용된 PPT 방식은 ECU의 커맨드에 의해 SAR의 duty를 조절해 준다. 이러한 방식은 태양 전지의 특성 변화를 프로세서가 계산함으로써, 프로세서의 타 작업과 함께 동작하므로 최대 전력 사용을 위해 프로세서의 의존성이 크다.

본 연구에서는 태양 전지의 효율을 극대화하기 위해 아날로그 방식의 최대 전력점 추적(MPPT) 장치를 제안하였다. 본 연구에서 제안한 MPPT는 태양 전지의 전압, 전류만을 입력으로 하므로 온도나 태양 광도 및 태양 전지의 노후에 따른 특성변화에 영향을 받지 않고 최대의 전력을 생산할 수 있으며, 간단한 아날로그 회로만으로 구현함으로써 제작 및 검증을 용이하게 하였다. 이는 위성에서 태양 전지의 특성 변화에 관계없이 최대의 전력을 생산하여, 위성의 전장품을 위한 원활한 전력 공급을 가능케 할 수 있다.

#### 참고 문헌

- [1] Kasemsan Siri, Vahe. A. Caliskan, C. Q. Lee, "Maximum Power Tracking in Parallel Connected Converters", IEEE Transaction on aerospace and electronics systems Vol. 29, No.3, July 1993
- [2] Bo H Cho, "Modeling, analysis design, and simulation of PPT spacecraft power systems", orbital sciences corporation report, VPEC. pp. 34-38, April 7, 1993
- [3] KARI, KOMPSAT-2 Critical Design Audit for Electrical Power Subsystem
- [4] 안준연 외, "계통 연계 단상 시스템을 위한 아날로그 MPPT", 전력전자기술대회 논문집. pp. 785-788, 2003