

태양전지 배열기의 최대 전력 추적 알고리즘 개발

박희성*, 장성수**, 장진백***, 박성우****, 이종인*****

The Development of Maximum Power Point Tracking Algorithm for The Solar Array

Hee-Sung Park*, Sung-Soo Jang**, Jin-Baek Jang***, Sung-Woo Park****, Jong-In Lee*****

Abstract

MPPT(Maximum power point tracking) is used in photovoltaic systems to maximize the solar array output power, irrespective of the temperature and irradiation conditions and of the load electrical characteristics. In this paper, new MPPT algorithm is proposed for the small satellite in LEO. As the proposed MPPT algorithm does not need any calculation of power by multiplication of voltage and current, it can be made by the simply analog circuit.

In this study, the proposed MPPT algorithm is verified by the simulation and experimental in the many conditions that can change the characteristics of the solar array.

초 록

최대 전력 추적 기법은 온도와 일사량의 조건 및 부하의 전기적 특성 변화에 관계없이 태양전지 배열기의 출력 전력을 최대화하기 위한 광발전 시스템에 사용된다. 본 논문에서는 저궤도 위성을 위한 최대 전력 추적 기법을 제안한다. 본 논문에서 제안한 최대 전력 추적 기법은 전력의 계산이 불필요하여 간단한 아날로그 회로만을 이용한 하드웨어 구현이 가능하다.

본 연구에서는 태양전지의 특성을 변화 시킬 수 있는 여러 조건을 가정하여 시뮬레이션과 실험을 통해 제안한 최대 전력 기법의 타당성을 입증하였다.

키워드 : 최대 전력 추적(maximum power point tracking), 피피티(peak power tracking), 태양전지배열기(solar array), 전력 변환(power conversion)

1. 서 론

일반적인 전기 에너지원(전기 화학적 배터리, 발전기 등)은 선형 전압원(Linear Voltage Source)의 특성을 가지고 있기 때문에, 부하의 특성에

* 위성전자그룹/hspark74@kari.re.kr

*** 위성전자그룹/jjb@kari.re.kr

***** 위성전자그룹/jilee@kari.re.kr

** 위성전자그룹/ssjang@kari.re.kr

**** 위성전자그룹/swpark@kari.re.kr

관계없이 항상 일정한 전압을 유지한다. 또한 이러한 전기 에너지원에는 하나의 동작점 만 존재하기 때문에 어떤 입력/출력 조건에서도 항상 안정한 시스템으로 동작한다. 즉 선형 전압원을 가지는 전기 에너지원을 사용할 때에는 부하조건에 관계없이 원하는 동작 조건을 얻어낼 수 있게 된다.

그러나 태양전지는 상기 기술한 전기 에너지원과는 완전히 다른 전기적인 특성을 가지고 있는 대표적인 비선형 소스로 구분된다. 특히 태양전지는 각각 다른 전압, 전류 조건에서 같은 전력을 출력하는 2개의 동작점을 갖고 있다. 이러한 현상 때문에 전력 변환시 시스템에서 과도한 리플 및 발진과 같은 불안정한 상태를 야기할 수 있다. 따라서 원하는 동작점에서 안정적인 출력 전력을 얻기 위해 태양전지의 전압, 전류의 동작점을 조절해 줄 필요가 있다.

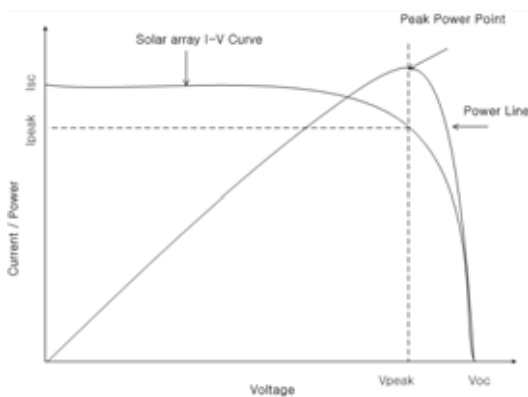


그림 1. 태양전지의 특성곡선

그림 1은 태양전지의 전압-전류, 전압-전력 특성을 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 전압-전력 곡선을 보면 최대 전력점을 기준으로 양쪽에 각각 같은 전력을 낼 수 있는 동작점이 존재하고 기울기가 영(zero)이 되는 동작점에서 최대 전력을 출력한다.

따라서 태양전지에서 최대 전력을 얻기 위해 태양전지의 전력 변환을 담당하는 SAR(Solar array regulator)를 적절히 조절해야 한다.

본 연구에서는 태양전지의 최대 전력 추적을 위해 기존에 사용되는 여러 가지 기법의 동작원리 및 장단점을 2장에 기술하고, 3장에서는 기존의 방법 보다 간단히 구현되고 효율이 우수한 최대 전력 추적 기법을 제안한다.

2. 최대 전력 추적 방법

2.1 Reference Array 측정 방법

전체 태양전지의 전류, 전압 특성을 대표할 수 있는 위치의 test solar cell을 선택하여, 이 cell을 측정하고 이 데이터를 이용하여 전체 태양전지의 최대 전력 동작점을 찾으려 하는 방법이다. 이 방법은 reference cell이 전체 태양전지의 전체 조건을 얼마나 정확하게 반영하는가에 의해서 정확도가 결정된다. 비교적 간단히 구현 될 수 있으나 기준 cell의 오차가 전체 시스템의 성능을 좌우하므로 태양전지가 전체적으로 동일한 조건에서 동작하지 않는 시스템에서는 적절하지 않다.

2.2 Incremental Conductance 측정법

이 방법은 태양전지의 증가분 임피던스와 DC 임피던스를 비교하는 방법이다. 최대 전력 동작점에서는 DC 저항값과 증가분 임피던스가 같은데, 아래의 과정에 의해서 도출된다.

$$\frac{dP}{dv} = \frac{d(V \cdot I(v))}{dv} = I \cdot \frac{dV}{dv} + V \frac{dI}{dv} = 0 \quad (1)$$

식(1)은 식(2)와 같이 간략화 된다.

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

작은 교란신호(perturbating signal)를 태양전지에 주입하여, 증가분 임피던스와 DC 임피던스가 일치할 때까지, 태양전지 전압을 조절한다.



그림 2. Incremental Conductance 알고리즘 순서도

이 방식의 동작순서는 그림 2와 같다. 처음 태양전지의 출력 전압과 전류를 측정하고, 출력 전압이 증가하는지 감소하는지 판별한다. 만약, 출력 전압이 감소했다면, 미소 증가분 임피던스 ($\frac{dV}{dI}$) 값과 그 때의 임피던스($\frac{V}{I}$) 값을 비교하여 같으면, $\frac{dP}{dV} = 0$ 이 되며 그 때가 최대 전력점이 되므로 제어를 바이패스 시킨다. 하지만 비교한 값이 같지 않으면, 어느 쪽이 더 크가를 비교하게 된다. 이때 미소 증가분 임피던스($\frac{dV}{dI}$)가 임피던스($\frac{V}{I}$) 값 보다 더 작으면, Vref 값을 증가시키게 된다. 이 경우는 $\frac{dP}{dV} > 0$ 로 동작점이 최대 전력점의 왼쪽에 있는 경우를 나타내기 때문이다. 반대로 미소 증가분 임피던스($\frac{dV}{dI}$)가 임피던스($\frac{V}{I}$) 값 보다 더 크면, Vref 값을 감소시키게 된다. 또 다른 경우는 출력 전압이 이전의 값보다 증가한 경우이며, 이때는 전력의 변화량을 보게 된다. 하지만 출력 전압을 알고 있으므로 전류의 변화량만으로 제어 방향을 결정할 수 있다. 우선 출력 전압이 증가했을 때 전류의 변화가 없다면, 이는 최대 전력점이라고 판단한다. 그리고 전류가 이전의 값보다 증가한 경우는 최대

전력점의 왼쪽에 있는 경우를 말하므로 Vref는 증가하게 되고, 전류가 이전의 값보다 감소한 경우는 그 반대가 된다.

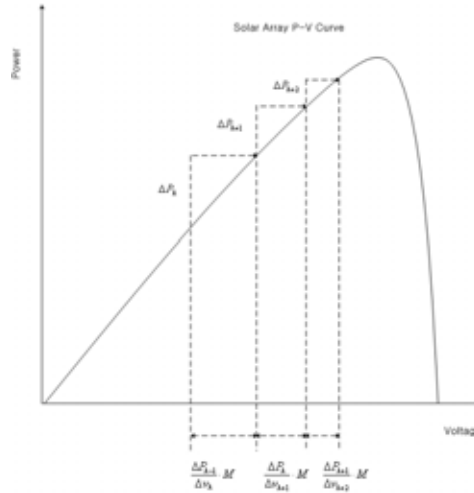


그림 3. Incremental conductance 추적 단계

Incremental conductance 방법을 구현 하였을 때 전압-전력의 관계는 그림 3과 같이 나타나 진다. 즉, 전력-전압 곡선에서 기울기가 커지면 제어전압 변동 폭도 커지므로 전력 최대점을 추종하는 속도도 이에 비례하여 빨라지게 된다. 이에 대한 관계식은 식(3)과 같다.

$$\begin{aligned}
 v_{ref}(k+1) &= v_{ref}(k) + M \frac{dp}{dv_s} \\
 &= v_{ref}(k) + \frac{MI_p}{V_p} [v_s(k) + v_s(k-1)]
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

단, M은 PPT의 스텝 크기의 계수

이 방법은 이론적으로는 간단해 보이지만, 아날로그 회로만으로 구현하기 위해서는 제어부 회로의 구성이 복잡해지기 때문에 최근에는 마이크로 프로세서와 같은 디지털 회로를 이용한다.

2.3 Perturbation & Observation

이 방법은 가장 널리 쓰이는 방법으로서, 하나

의 동작 곡선에서 태양전지의 최대 전력 동작점이 유일하다는 가정에서 출발한다. 이 가정에 의해서 최대 전력 동작점에서의 전력 기울기는 영(zero)이 되므로, 적당한 시간간격으로 샘플링한 출력전력의 크기를 비교하고 태양전지의 전압을 조절하여, 최대 전력 동작점을 찾게 된다.



그림 4. P & O 알고리즘 순서도

일정한 스텝으로 태양전지의 전압을 흔들어서 최대전력을 추적하는 제어방법으로 제어 알고리즘 순서도를 그림 4에 나타내었다. 태양전지의 전압 $V(k)$ 와 전류 $I(k)$ 를 곱하여 출력 전력을 계산하고, 이를 기존의 전력값과 비교하여 부호 판정을 한 뒤, 크면 다시 기존의 전압과 현 전압을 비교하여 최대 전력점의 왼쪽 slope에 있는지 오른쪽 slope에 있는지를 판별한다. 따라서 이 판별에서 현 전압이 기존 전압 보다 크면 왼쪽 slope에 있게 되고 step만큼 V_{ref} 에 더하고, 작으면 step의 부호를 바꿔서 V_{ref} 에 더해준다. 오른쪽 slope에 동작점이 있는 경우, 그 반대로 V_{ref} 를 변화시켜 주도록 조절한다. 이러한 방식으로 제어기의 전압 지령치인 V_{ref} 는 최대 전력점을 기준으로 step 만큼의 차이를 갖는 전력이 같은 두 지점을 찾아가게 된다. 이때 step의 크기가 충분히 작으면 최대 전력점과 거의 같게 되어 MPPT를 수행하게 된다.

2.4 Dithering Signal 주입법

이 방법은 태양전지의 전압-전력 특성을 이용한 것으로, 최대 전력 동작점을 기준으로 태양전지 전압이 최대 전력 동작점 보다 작은 영역에서는 출력 전력이 태양전지 전압과 비례하는 특성이 있고, 반대로 태양전지 전압이 최대 전력 동작점 보다 큰 영역에서는 출력 전력과 태양전지 전압이 반비례하는 특성이 있다. 따라서 태양전지 전압의 ac성분과 출력 전력의 ac 성분의 곱이 양이 되면 태양전지 전압을 증가시키고, 음이 되면 태양전지 전압을 감소시키면 최대 전력 동작점 부근에서 동작하게 된다.

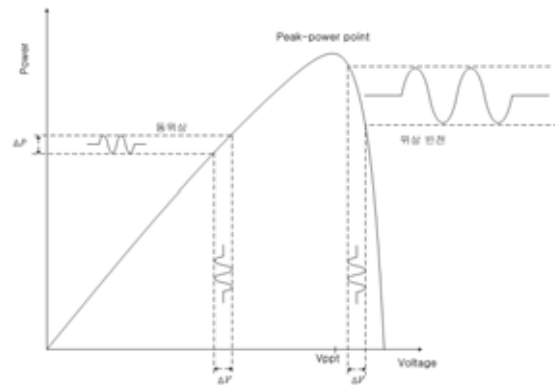


그림 5. Dithering signal 중첩 MPPT 주파수 특성

그림 5는 태양전지의 전압-전력 곡선에 dithering signal을 주입할 때 위상의 중첩을 보여준다. 곡선을 보면 최대 전력 동작점에서의 전압(V_{pvt})을 기준으로 이하의 전압에서는 전압의 기울기와 전력의 기울기가 같은 위상을 갖는다. 반면 V_{pvt} 이상에서는 서로 다른 위상의 기울기를 갖는다.

그림 5에서와 같이 일정한 주파수로 태양전지 전압(V_{pv})를 흔들어 주면 V_{pvt} 를 기준으로 왼쪽의 전력 기울기에서는 전력과 같은 위상으로 흔들리며 오른쪽 전력 기울기에서는 전력과 전압이 180° 의 반전된 위상으로 흔들리게 된다. 따라서 V_{pv} 와 전력을 측정하여 교류 리플 성분을 취하여 서로 곱하고 곱한 값을 다시 적분하면 왼쪽

영역에서의 기울기는 양의 값이, 오른쪽 영역에서의 기울기는 음의 값이 나오게 된다. 양의 값일 경우 V_{ref} 를 증가시켜 V_{pv} 를 증가시키는 방향으로 제어하고, 반대로 음의 값일 경우 V_{pv} 를 감소시키는 방향으로 제어해야 한다. 그림 6은 기술한 제어 알고리즘을 순서도로 나타낸 것이다.

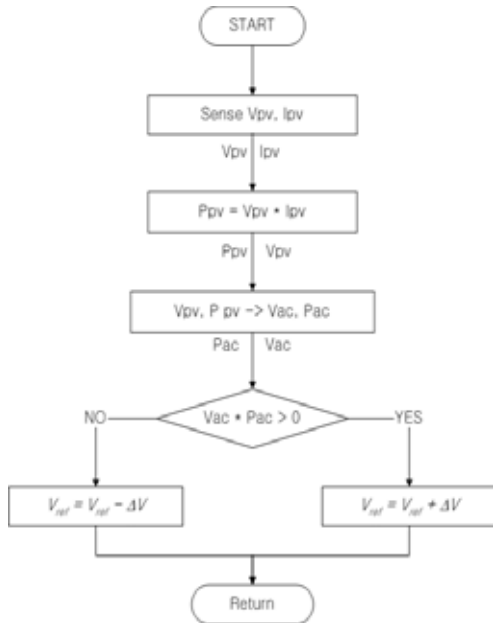


그림 6. Dithering signal 중첩 MPPT 제어 알고리즘 순서도

최대 전력 추적이 정상적으로 수행하게 되면 V_{pv} 는 최대 전력 동작점 부근에서 dithering signal의 주파수로 흔들리게 된다. 반면 전력은 전압의 한주기 동안 최대 전력 동작점을 두 번 지나게 되므로, dithering signal의 두배 주파수로 흔들리게 된다. 따라서 태양전지 전압과 전력의 주파수를 비교해 보면 최대 전력 추적의 수행 여부를 알 수 있다. 그림 7은 최대 전력 동작점에서의 전압과 전력의 변동 모습을 보여준다.

이 제어방법은 강제로 기준 전압을 흔들며 줌으로써 기준 전압의 주파수와 같은 출력의 리플이 발생하게 된다.

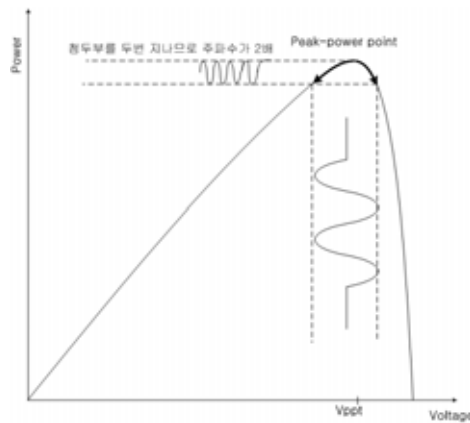


그림 7. 최대 전력 동작점에서 출력 전력과 V_{pv} 의 주파수 특성

3. 제안된 최대 전력 추적 알고리즘

저궤도 위성의 태양전지 배열기는 태양의 방사량과 온도의 편차가 매우 크다. 따라서 태양전지 배열기의 출력 전력의 편차 또한 매우 크다. 기존의 최대 전력 추적 기법들은 태양전지의 전압과 전류를 측정하여 전력을 계산하고 이를 이용해 최대 전력 동작점을 찾게 되는데, 저궤도 위성에서는 상기 기술한 바와 같이 매우 큰 전력 편차를 갖게 된다. 따라서 아날로그 회로를 이용한 구현이 용이하지 않다.

본 연구에서 제안한 방식은 태양전지 배열기의 전압과 전류 값을 이용하여 최대 전력 추적이 가능하여 아날로그 회로의 구현이 가능케 하였다.

3.1 동작원리

그림 8의 전압-전력 곡선을 보면 전력이 같은 두 지점이 최대 전력 동작점 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 수식

으로 표현하면 다음과 같다.

정상 상태에서 $P_1 = P_2$ 일때,

$$P_1 = I_1 \cdot V_1, P_2 = I_2 \cdot V_2$$

만일, $V_1 = k \cdot V_2$ 면

$$I_2 = k \cdot I_1 \quad (4)$$

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

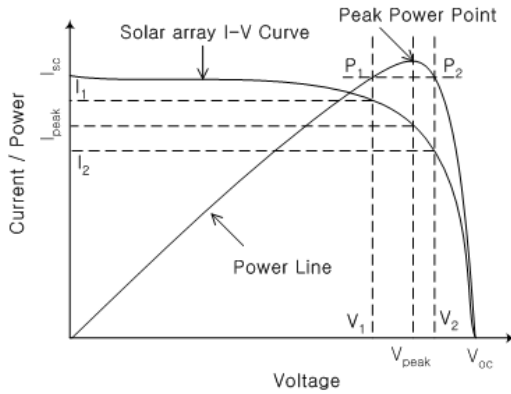


그림 8. 최대 전력점에서의 특성 곡선

본 최대 전력 추적 알고리즘의 원리는 태양전지의 전압-전류 곡선이 최대 전력 동작점의 왼쪽에 있을 때는 $\Delta I / I_{ppt} > \Delta V / V_{ppt}$ 특성이 있고, 오른쪽에 있을 때는 $\Delta I / I_{ppt} < \Delta V / V_{ppt}$ 특성이 있음을 이용한 것이다(단, $\Delta I = I - k \cdot I$, $\Delta V = V - k \cdot V$). 그림 8의 전압-전력 곡선에서 보면 하나의 동작점은 최대 전력 동작점을 지나 전압-전력 곡선의 반대쪽 경사의 같은 전력이 되는 동작점에 수렴하게 되는 것을 알 수 있다. 즉 위의 알고리즘을 만족하는 두 동작점의 사이에 최대 전력 동작점이 오게 되는데 이는 식 (6)을 통해서도 확인할 수 있다. 일반적으로 태양전지의 최대 전력 동작점에서는 식 (5)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 (6)의 관계를 얻을 수 있다.

$$\frac{dV}{dI} = -\frac{V}{I} \quad (5)$$

$$\frac{V}{I_1} < \frac{V_1}{kI_1} = -\frac{V_1 - V_2}{I_1 - I_2} = \frac{kV_2}{I_2} < \frac{V_2}{I_2} \quad (6)$$

그리고 정상 상태에 이르게 되면, 식 (4)와 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 (6)에서 k 값이 '1'에 수렴하면, 식 (7)을 만족한다.

$$\frac{V_1}{I_1} = -\frac{V_1 - V_2}{I_1 - I_2} = \frac{V_2}{I_2} \quad (7)$$

이는 결국 두 동작점이 모두 최대 전력 동작점에 있음을 의미한다. 따라서 k 값이 '1'에 가까울수록 두 동작점은 최대 전력 동작점에 수렴한다는 것을 알 수 있으며, 결국 k 값이 최대 전력 추적 제어의 정확성과 관련이 있음을 확인할 수 있다. 또한 k 값에 따라 정상 상태에 도달하는 횟수가 결정되는데, k 값이 크면 순환 횟수가 더 증가하고, k 가 작으면 순환 횟수는 줄어들게 된다. 이는 결국 k 값이 최대 전력 추적 속도와 정밀도와 관련 있음을 나타낸다.

그림 9는 제안된 최대 전력 추적 제어 기법의 동작 순서도이다. 그림 9의 순서도에서 "SET I" 부터 시작하여 "SET V"까지의 동작은 그림 10에서 보면 동작점이 'S₁₁'에서 'S₁₂'로 이동하는 과정이 되며, 이 과정은 초기 동작점에서의 전류(I₁)와 그 전류의 k 배의 비교를 통해 판별식을 만족할 때까지 전압을 계속 증가시키게 된다. 그리고 판별식을 만족하면 새로운 동작점에서 다시 그림 9의 "SET V"에서 "SET I"까지의 동작을 수행한다. 이는 그림 10의 '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.

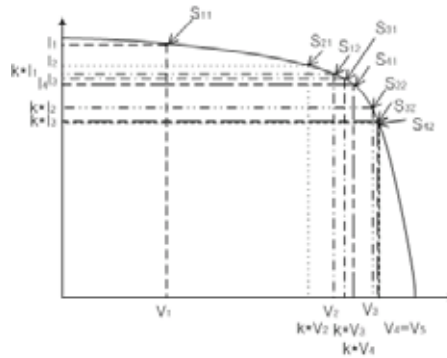


그림 10. 전압-전류 곡선에서의 MPPT 동작점 경로

표 1. 태양전지 동작점과 전압, 전류

위치	S_{11}	S_{12}	S_{21}	S_{22}
동작점	V_1, I_1	$V_2, k \cdot I_1$	$k \cdot V_2, I_2$	$V_3, k \cdot I_3$
위치	S_{31}	S_{32}	S_{41}	S_{42}
동작점	$k \cdot V_3, I_3$	$V_4, k \cdot I_3$	$k \cdot V_4, I_4$	$V_5, k \cdot I_4$

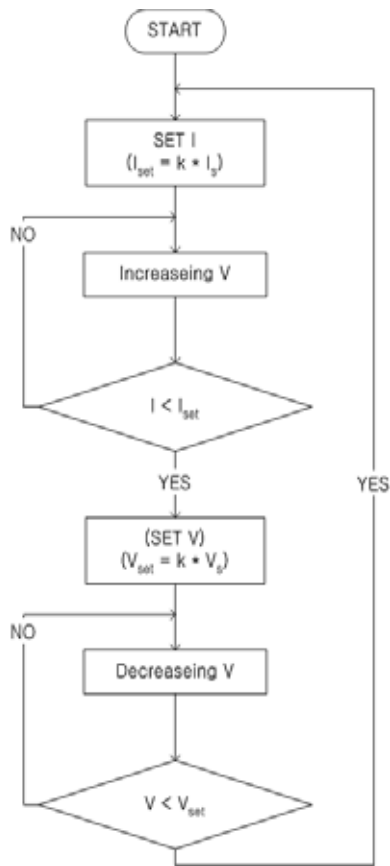


그림 9. MPPT 동작 순서도

그림 3은 전력-전압 곡선상에 MPPT 알고리즘에서 최대 전력의 동작점 이동경로를 보여주며 표 1과 같이 동작점이 이동한다.

3.2 하드웨어 구성

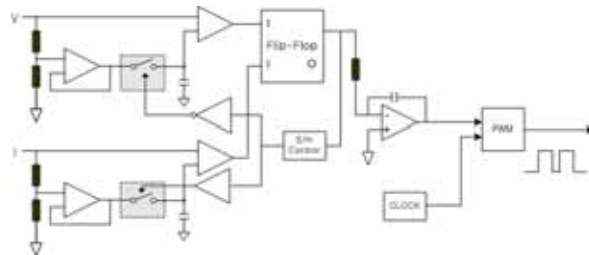


그림 11. MPPT H/W 구성도

그림 11은 본 연구에서 제안한 최대 전력 추적 알고리즘을 구현하기 위한 하드웨어의 구성도이다. 하드웨어의 구성을 보면 태양전지의 전압을 측정하고, 이에 대한 k 배수를 취하는 전압 검출부와, 태양전지로부터 출력되는 전류를 측정하고, 이에 대한 k 배수를 취하기 위한 전류 검출부, 상기 전압 검출부의 출력 전압과 전류 검출부의 출력 전류를 샘플링하고 특정 전압, 전류에

서 유지하기 위한 각각의 샘플 앤 홀드회로, 태양전지의 현재 전압, 전류와 유지된 전압, 전류를 비교하기 위한 각각의 비교기와 비교된 값을 판별하여 태양전지 출력 전압을 제어하고 샘플링과 홀딩을 위한 신호를 생성하는 플립-플롭, 그리고 플립-플롭에 의해 생성된 이산된 신호를 연속적인 아날로그 신호로 변화해 주는 적분기로 되어 있다.

4. 시뮬레이션 및 실험 결과

제안된 최대 전력 추적 기법의 실험에서는 전력변환을 위해 일반적으로 사용되는 Buck converter를 사용하였으며, 사용된 컨터버의 스위칭 주파수는 저궤도 위성 1호, 2호에서와 같이 100kHz로 설정하였다.

4.1 시뮬레이션 결과

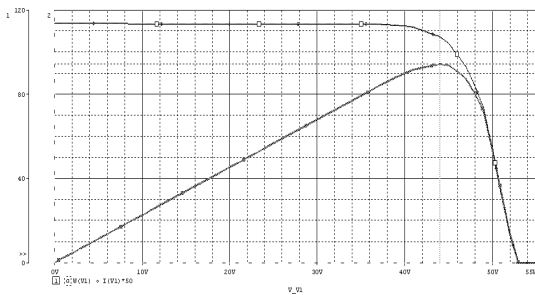


그림 12. 시뮬레이션에 적용된 태양전지의 전압-전류, 전압-전력 곡선

그림 12는 시뮬레이션을 위하여 태양전지를 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 13은 초기 구동에서 정상상태에 도달할 때까지의 응답 특성을 보여준다. 그림 14는 MPPT의 정상 상태 특성을 보여준다. 본 시뮬레이션에서 k는 0.98로 선정하여 MPPT의 자체 진

동 폭을 최소화 하고자 하였다.

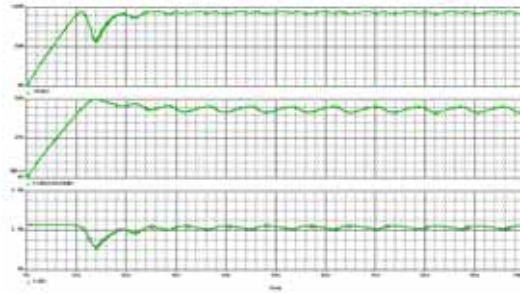


그림 13. 태양전지의 전력, 전압, 전류 응답 특성

그림 14에서 나타난 것처럼 출력전력 94[W], 전압 44[V], 전류 2.1[A]로 그림 12에서 근사화한 태양전지의 최대 전력 동작점에서 동작함을 볼 수 있다. 제안한 최대 전력 추적 기법은 전술한 바와 같이 태양전지의 전압-전류 곡선에서 출력 전력이 최대 전력 동작점을 기준으로 왼쪽과 오른쪽으로 미세 진동을 한다. 이를 그림 14의 전력 파형으로 확인할 수 있다. 제안한 최대 전력 추적 기법의 원리상 이와 같은 리플은 반드시 발생하지만, 리플의 Peak-to-Peak가 출력전력의 2% 이내로써 미세하다.

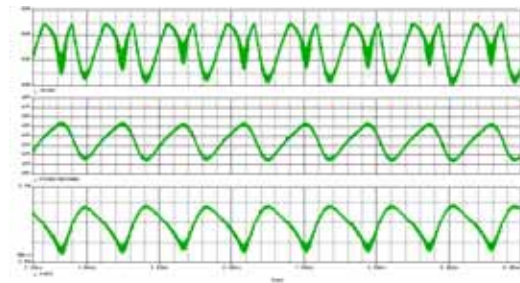


그림 14. 정상 상태에서의 전력, 전압, 전류 응답 특성

4.2 실험 결과

실험을 위하여 SAS(Solar array simulator)를 이용하였으며, 부하의 변동시와 전압-전류 특성 곡선 변경시의 최대 전력 추적 파형을 그림 15와 그림 16에 각각 보여준다.

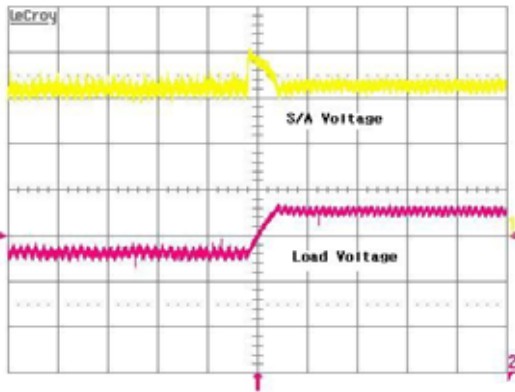


그림 15. 부하 변동시의 S/A 전압, 부하전압 응답 특성

그림 15는 부하의 변동시 태양전지의 전압 변화와 부하 전압 변화를 보여준다. 위 파형에서 부하의 변동시에도 태양전지의 최대 전력 동작점의 전압 위치에서 동작이 유지됨을 볼 수 있다.

그림 16은 동일 부하에서 태양전지의 최대 전류 값과 단락 전류 값을 변경시 태양전지 전압, 전류의 특성을 보여준다. 이 결과 파형에서 전압-전류 특성곡선의 전류 값을 변경시에도 태양전지의 최대 전압 값은 유지됨으로써 최대 전력을 생산함을 볼 수 있다.

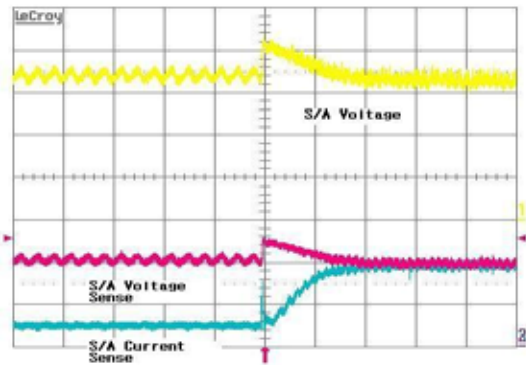


그림 16. V-I Curve 변경시 S/A 전압, S/A 전류 응답 특성

5. 결 론

본 연구는 저궤도 위성에서 사용되는 태양전지 배열기의 최대 전력을 생산하고자, SAR의 동작을 제어하여 항상 태양전지 배열기의 최대 전력을 추적하는 제어기법을 제안하였다. 제안한 최대 전력 추적 기법을 간단한 아날로그 회로로 제작하였으며, 시뮬레이션과 실험을 통하여 부하 변동, 온도 변화 등에 관계없이 태양전지 배열기의 최대 전력 추적이 정상적으로 동작함을 검증하였다.

참 고 문 헌

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, 1993, pp. 34-38.
3. 안준연 외, "계통 연계 단상 시스템을 위한 아날로그 MPPT", 전력전자학술대회 논문집, 2003, pp. 785-788.