

# 인공위성 시스템을 위한 태양전지 전력조절기의 저항제어

배현수, 양정환, 이재호, 조보형  
 서울대학교 전기공학부

## Resistive Current Mode Control for the Solar Array Regulator of SPACE Power System

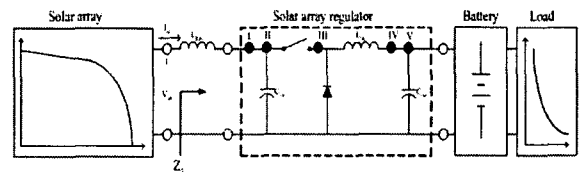
H. S. Bae, J. H. Yang, J. H. Lee and B. H. Cho  
 Department of Electrical Engineering, Seoul National University

### ABSTRACT

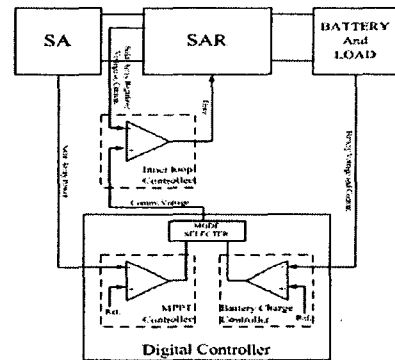
저궤도 인공위성 전력계 시스템의 설계 및 해석을 위한 태양전지 전력조절기의 대신호 안정도 해석을 수행한다. 태양전지 전력조절기에서 제어가능한 모든 방법에 따른 태양전지에서 바라본 태양전지 전력조절기의 부하특성을 분류하고, 상태공간 해석을 이용하여 태양전지 시스템의 대신호적 안정도를 해석한다. 또한, 본 논문에서는 태양전지 전력조절기의 부하특성을 정전력부하에서 정저항부하로 변환하여 대신호적인 안정도를 확보하는 비선형변환을 제안한다. 제안된 변환기법을 통해 최대전력점 추적제어나 배터리 충전제어 및 전류분배제어가 가능한 병렬 모듈 태양전지 레귤레이터에 적합한 단일 전류 제어기를 구성한다. 제안된 대신호 해석과 저항제어를 검증하기 위해, 200W급 태양전지와 100W급 태양전지 전력조절기 두 모듈을 병렬로 구성하여 실험하였다.

### 1. 서론

인공위성의 주 전력원인 태양전지는 매우 비선형적인 전압-전류특성을 가지고 있다. 태양전지의 동작점은 주변 온도 및 일사량, 그리고 전력조절기의 부하특성에 의해 결정되어 넓고 다양한 형태의 동작모드가 존재하게 된다. 따라서, 태양전지와 부하간의 결합에 의한 평형점들에 대한 안정도 특성을 분류하고 해석할 필요가 있다. 그림 1(a)는 저궤도 인공위성에서 주로 사용하는 직렬구조형 태양전지 전력조절기 시스템을 나타낸다. 태양전지 전력조절기는 최대전력점 추적제어나 배터리 충전제어를 위해 태양전지의 출력을 제어하게 된다. 그림 1(a)에서 보여지듯이 제어 목적을 수행하기 위한 전압/전류의 제어가능점이 다양하게 존재한다. 본 논문에서는 제어가능점들에 따른 제어기 구조별로 태양전지에서 바라본 태양전지 전력조절기의 부하특성을 분류하고, 각각의 부하특성에 따른 대신호적 안정도 해석을 수행한다. 또한, 현재 인공위성에서 요구되어지는 전력량의 증가로 인해 태양전지 전력조절기의 병렬모듈 구성에 대한 관심이 늘고 있다. 이런 요구조건에 부합하여 병렬모듈 제어와 신뢰성 향상을 위한 단일 전류 제어기로의 구성이 종종 사용되어지고 있다. 그러나, 태양전지 시스템의 특성상 일반적인 전력단에서 사용되어지는 출력제어형 전류제어기의 경우 대신호적 불안정성을 유발하게 된다. 따라서, 본 논문에서는 디지털 제어기로 구성될 비선형 알고리즘을 이용한 정저항부하 특성 변환을 통해 전체 시스템의 불안정성을 해결하는 방법을 제안하고, 대신호 해석 및 변환방법을 실험을 통해 검증한다.



(a) 직렬구조형 태양전지 전력조절기 시스템  
 (a) A series configuration of the solar array regulator system



(b) 일반적인 태양전지 전력조절기의 제어방법  
 (b) The conventional control strategies of the solar array regulator system

그림 1 저궤도 인공위성의 태양전지 전력시스템  
 Fig. 1 The solar array power system for the LEO satellite

## 2. 태양전지 전력시스템의 대신호 안정도 해석

### 2.1 정전력 부하 제어

태양전지 전력조절기의 출력전류(그림 1(a)의 IV)를 평균전류제어기로 제어하거나 출력 배터리전압(V)을 전압제어기로 제어할 경우 태양전지에서 바라본 태양전지 전력조절기의 부하특성은 배터리전압이 거의 상수이기 때문에 정전력 부하의 성격을 가진다. 그림 2에서 보여지듯이 정전력 부하제어의 경우 두 개의 평형점이 존재하게 되며, 대신호적 동작 특성은 각각의 평형점의 안정도에 의해 결정된다. 대신호 해석을 위해 태양전지와 부하특성을 2차 시스템으로 등가회로화 할 수 있다. 여기서, 저역필터는 시스템에서 존재하는 선로 인덕턴스와 같은 실제 존재하는 물리량을 나타낸다. 등가회로에서 인덕턴스 전류와 캐패시터 전압에 대한 상태방정식을 선형화를 통해 유도하여, 특성근을 계산할 수 있다. 여기서,  $r_{sa} < 0$ 와  $r_{sar} > 0$ 는 각각 태양전지와 부하의 기울기를 나타내는 소신호 저항이다.

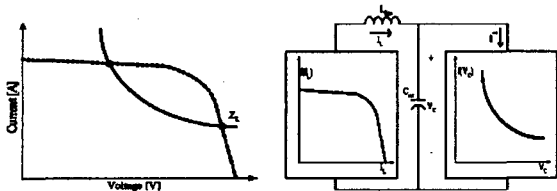


그림 2 정전력 부하제어 회로 등가모델  
Fig. 2 Equivalent circuit model of a constant power load

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{2} \left( \frac{r_{sa}}{L} - \frac{1}{r_{sar}C} \right) \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left( \frac{r_{sa}}{L} - \frac{1}{r_{sar}C} \right)^2 - \frac{4}{LC} \left( 1 - \frac{r_{sa}}{r_{sar}} \right)} \quad (1)$$

결과에서 알 수 있듯이 두 개의 동작점중 전류원영역에서는 불안정하고 전압원영역에서는 안정함을 알 수 있다. 그림 3은 평균전류제어기를 이용한 정전력 부하 제어의 실험결과이다. 대신호 해석에서 분석되었듯이 기준전압을 A에서 B, C, D로 변화시킬 경우 전압원영역에서는 안정적인 동작점을 형성하나 전류원영역에서는 불안정하여 배터리전압으로 고정됨을 확인할 수 있다.

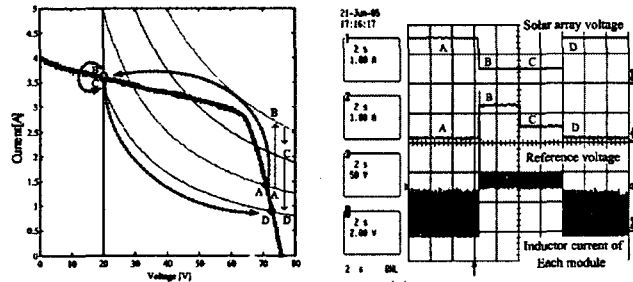


그림 3 정전력 부하 제어의 동작점 이동  
Fig. 3 Operating point change of constant power control

## 2.2 가변전력 부하 제어

태양전지 전력조정기의 출력전류(그림 1(a)의 IV)를 피크전류제어기로 제어할 경우 태양전지에서 바라본 태양전지 전력조정기의 부하특성은 정전력 부하와는 달리 가변전력 부하의 성격을 가진다. 일반적인 피크전류제어기의 경우 그림 4와 같이 전류제어기의 안정성을 위해 외부 삼각파를 추가하게 되는데, 이로 인해 부하의 성격이 정전력부하에서 삼각파의 기울기에 따라 부하의 형태가 변형되는 가변전력부하의 성격을 가지게 된다. 그러나, 기본적으로 출력전류를 제어하는 정전력 부하 제어의 성격을 가지고 있어 여전히 일부 전류원영역에서 불안정한 동작점을 가지며 다중 동작점을 형성하게 된다. 그림 5는 피크전류제어기를 이용한 가변전력 부하 제어의 실험결과이다. 기준전압을 A에서 B, C로 변화시킬 경우 동일한 기준전압에 대하여 다중 평형점에 의해 전혀 다른 동작점을 형성하게 됨을 알 수 있다.

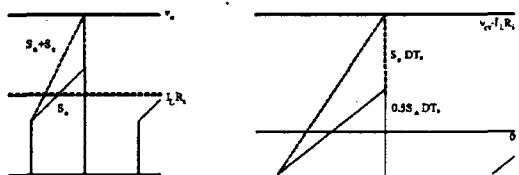


그림 4 피크전류제어기 동작파형  
Fig. 4 Operation waveform of the peak current mode controller

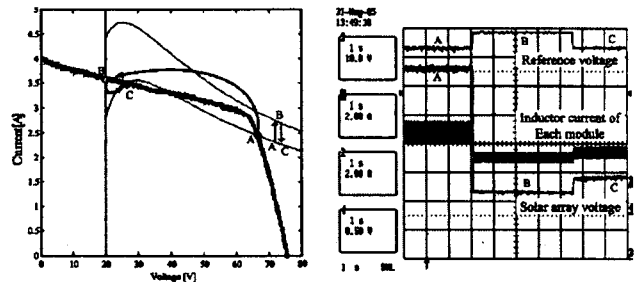


그림 5 가변전력 부하 제어의 동작점 이동  
Fig. 5 Operating point change of variable power control

## 2.3 정전압 부하 제어

태양전지 전력조정기의 입력전압(그림 1(a)의 II)를 전압제어기로 제어할 경우 태양전지에서 바라본 태양전지 전력조정기의 부하특성은 제어기에 의해 상태가 고정되기 때문에 정전압 부하의 성격을 가진다. 정전압 부하 제어의 경우 정전력 부하 제어와 달리 그림 6에서 보여지듯이 태양전지 전영역에 대해 안정한 하나의 동작점만을 형성하며, 특성곡선은 다음과 같다.

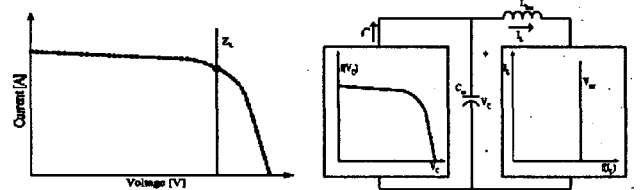


그림 6 정전압 부하제어 회로 등가모델  
Fig. 6 Equivalent circuit model of a constant voltage load

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{2} \frac{1}{r_{sa}C} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left( \frac{1}{r_{sa}C} \right)^2 - \frac{4}{LC}} \quad (2)$$

그림 7은 정전력 부하 제어에 전압제어기를 추가한 이중루프 제어기를 이용하여 실험한 정전압 부하 제어의 실험결과이다. 태양전지 전영역에서 기준전압의 변화에 대하여 안정한 하나의 동작점을 형성함을 확인할 수 있다.

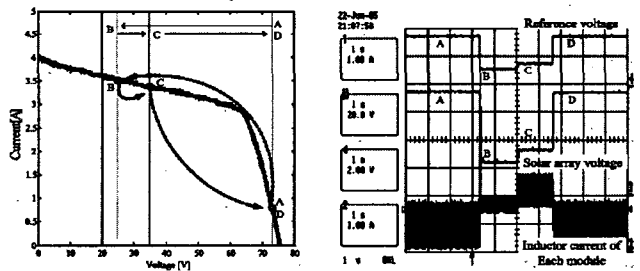


그림 7 정전압 부하 제어의 동작점 이동  
Fig. 7 Operating point change of constant voltage control

## 2.4 정전류 부하 제어

태양전지 전력조정기의 평균스위치전류(그림 1(a)의 III)를 적분전류제어기로 제어하거나 입력필터전류(I)를 평균전류제어기로 제어할 경우 태양전지에서 바라본 태양전지 전력조정기의 부하특성은 제어기에 의해 정전압 부하 제어와 같이 상태가 고정되기 때문에 정전류 부하의 성격을 가진다. 또한, 정전류 부하 제어는 그림 8에서 보여지듯이 태양전지 전영역에 대해 안정한 하나의 동작점만을 형성하며, 특성곡선은 다음과 같다.

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{2} \frac{r_{sa}}{L} \pm \frac{1}{2} \sqrt{\left( \frac{r_{sa}}{L} \right)^2 - \frac{4}{LC}} \quad (3)$$

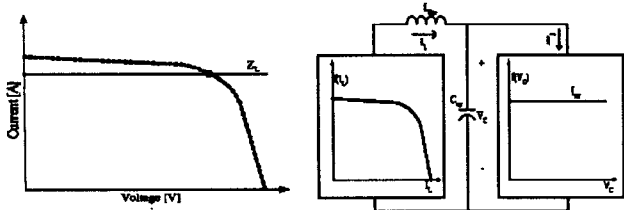


그림 8 정전류 부하제어 회로 등가모델  
Fig. 8 Equivalent circuit model of a constant current control

그림 9는 적분전류제어기를 이용하여 실험한 정전류 부하 제어의 실험결과이다. 태양전지 전영역에서 기준전압의 변화에 대하여 안정한 하나의 동작점을 형성함을 확인할 수 있다.

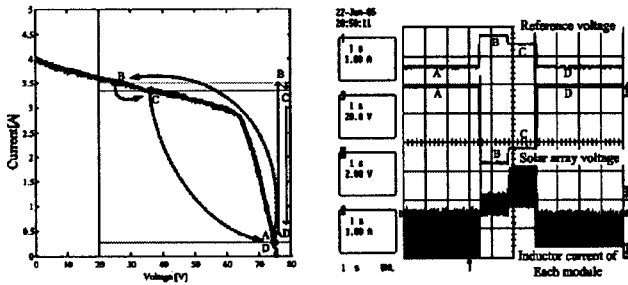


그림 9 정전류 부하 제어의 동작점 이동  
Fig. 9 Operating point change of constant current control

### 3. 정저항 부하제어

그림 10은 정저항 부하 제어의 특성과 등가회로를 나타내었다. 그림에서 보여지듯이 정저항 부하 제어의 경우도 태양전지의 전영역에 대하여 안정적인 하나의 동작점을 형성함을 알 수 있다. 따라서, 만약 태양전지에서 바라본 태양전지 레귤레이터의 부하 특성을 정저항 부하로 변환할 수 있다면 전체 시스템은 안정하다. 앞서 제안된 모든 방법의 경우 변환을 통해 전부 정저항 부하로의 변환이 가능하나, 여기서는 대신호적으로 불안정성을 가지는 정전류 부하 제어에서 정저항 부하 제어로의 변환만을 보이겠다. 평균전류제어기를 사용한 정전류 부하 제어에서의 기준전압을 전력단 계수로 표현하면 다음과 같다.

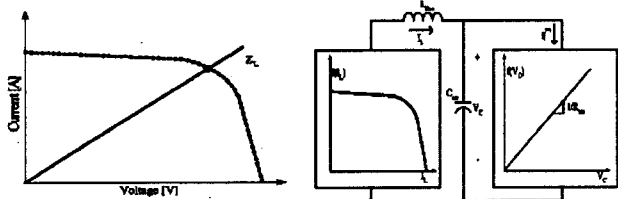


그림 10 정저항 부하제어 등가 회로모델  
Fig. 10 Equivalent circuit model of a constant resistive load

$$v_C = R_i i_L = \frac{v_{sa} i_{sar} R_i}{v_B} = \frac{P_{sar} R_i}{v_B} \quad (4)$$

식(4)에서 알 수 있듯이 전력에 비례함을 알 수 있다. 정저항 부하로의 변환은 옴의 법칙을 이용하여 태양전지 전력 조절기의 저항으로 표현하면 다음과 같이 변환할 수 있다.

$$v_C = \frac{v_{sa} i_{sar} R_i}{v_B} = \frac{v_{sa}^2 R_i}{v_B^2 r_{sa}} \quad (5)$$

따라서, 기준전압을 식(5)와 같이 제어할 수 있으면 태양전지에서 바라본 태양전지 전력조절기의 부하특성은 정저항 부하로 변환된다. 실제 시스템의 특성상 디지털 제어기를 가지고 있기 때문에 이는 추가적인 하드웨어 변형없이 쉽게 그림 11과

같이 구현될 수 있다. 그림 12는 평균전류제어기와 디지털 제어기를 이용한 정저항 부하 제어의 실험결과이다. 태양전지 전영역에서 기준전압 변화에 대해 안정화되었음을 알 수 있다.

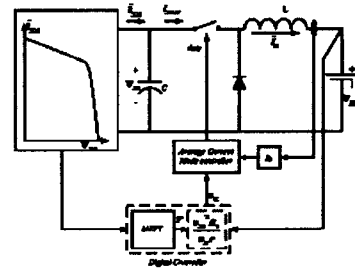


그림 11 평균전류제어기를 이용한 정저항 부하제어  
Fig. 11 Resistive control using average current mode controller

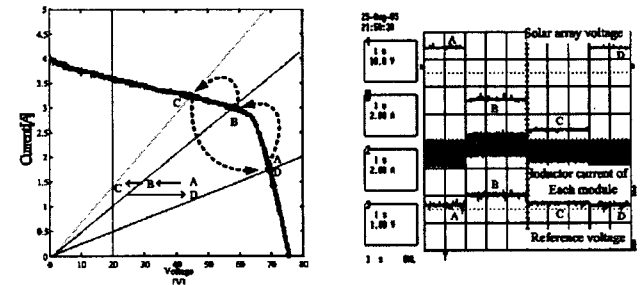


그림 12 정저항 부하 제어의 동작점 이동  
Fig. 12 Operating point change of constant resistive control

### 4. 결론

저궤도 인공위성의 태양전지 전력조절기 설계 및 해석을 위한 대신호 해석을 수행하였다. 태양전지에서 바로 본 태양전지 전력조절기의 부하 특성을 제어기별로 분류하여, 최대전력점 추적제어 및 배터리 충전제어의 적합성을 대신호 해석을 통해 확인하였다. 정전력 또는 가변전력 부하 제어의 경우는 전류영역에서의 불안정성과 다중 동작점 형성으로 적합하지 않으며, 정전압이나 정전류 부하 제어가 적합함을 증명하였다. 또한, 불안정성을 가지는 부하특성을 디지털 비선형 변환을 통해 정저항 부하제어로의 변환을 제시하여 전체 시스템을 안정화시킬 수 있음을 보이고, 실험을 통해 증명하였다.

이 논문은 한국항공우주연구원(KARI)의 연구비 부분지원에 의하여 연구되었습

### 참고 문헌

- [1] "KOMSAT3 Technical Report", KARI, 2005.
- [2] B. H. Cho, J. R. Lee, F. C. Lee, "Large Signal Stability Analysis of Spacecraft Power Systems", IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 5, No. 1, pp. 110-115, 1990.
- [3] J. H. Lee, S. H. Park, H. S. Bae, and Bo. H. Cho, "Constant Resistance Control of Solar Array Regulator Using Average Current Mode Control", APEC 2006, Vol. 1, pp. 1544-1549, Mar. 2006.
- [4] H.S. Bae, J.H. Lee and B.H. Cho, "Large Signal Stability Analysis of the Solar Array Power System Using the Controlled Load Characteristic", IECEC 2006, June 2006.