

정지궤도 통신위성용 태양전지 전원 시뮬레이터 개발

정규범^o, 최재동*, 최성봉*, 이상석**, 신동희**

^o우석대학교 정보통신공학과, *한국항공우주연구소, 무궁화위성그룹, ** (주) 파워테크

Solar Cell Simulator for GEO communication spacecraft

G. B. Joung^o, J. D. Choi*, S. B. Choi*, S. S. Lee**, D. H. Shin**

^oDept. of Information and Communication Eng., Woosuk University,

*Koreasat Group, Korea Aerospace Research Institute, **Powertec Co.

Abstract

This paper has been analyzed, modeled, designed, fabricated, and tested for solar cell simulator which has solar array characteristics. The main purpose is the development of solar cell simulator to test electrical power subsystem for GEO Communication Spacecraft. The maximum power of the simulator is about 5 kW, which is consist of 12 independent simulator modules with 420 W power rating. The 12 simulator modules are independently controlled like as real solar array system.

I. 서론

위성의 전력계 서브시스템은 전력의 발생, 제어, 분배 및 저장의 역할을 함으로서 위성의 각 서브시스템과 탑재체가 기능을 하도록 전기 에너지를 공급하는 역할을 한다.^[1-7] 전기 에너지의 공급은 태양전지를 이용하여 태양에너지를 전기에너지로 바꾸어 사용하게 된다. 무궁화 위성 1, 2 호를 비롯한 정지궤도 통신위성은 사용되는 탑재체의 규모가 커지고 대형화되는 추세에 있어서 점차 더 많은 전력을 사용하게 되었다.^[1-5]

따라서, 전력계 서브시스템의 전력용량 증가에 따라 대용량에 적합한 정지궤도 통신위성용 배터리 충전기 및 방전기와 전력조절장치는 이미 미국 등 위성 선진국들은 이미 개발하여 상용화 단계에 있다. 특히, 국내에서 추진하고 있는 무궁화 3호기에도 무궁화 1, 2호기의 3배에 가까운 4.6 kW 급의 전력을 갖는 전력장치를 이미 적용하고 있다.^[4]

그런데, 대용량 전력계 서브시스템의 개발을 위해서

는 정확한 모의 전원 특성을 갖는 대용량 태양전지 시뮬레이터가 필요하다. 태양전지 전원 시뮬레이터의 개발에 있어서 가장 중요한 것은 실제의 태양전지 특성을 갖도록 시뮬레이터를 개발하는 것이다.

본 논문에서는 위성용 태양전지 특성을 갖는 태양전지 시뮬레이터에 대하여 해석, 모델링, 설계 및 실험을 수행하였다. 또한, 태양전지 시뮬레이터는 앞으로 개발될 전력계 핵심부품에 대하여 위성환경 변동에 따른 태양전지 특성변화를 모사하여 여러 가지 실험을 할 수 있도록 태양전지 VI 특성 커브를 컴퓨터에서 모델링된 명령어로 모사할 수 있도록 구성하였다. 태양전지 시뮬레이터는 대략 5 kW의 출력이 가능하며, 위성 태양전지 시스템의 태양전지판의 구성을 고려하여 12 개의 모듈로 구성하였다.

II. 태양전지판 해석

2.1 정지궤도 통신위성 전력계 서브시스템

대표적인 정지궤도 통신위성인 무궁화위성 3호는 North와 South에 2 개의 태양전지판(solar array)을 갖는다. 무궁화 위성 3호는 무궁화 위성 1, 2호에 비해 대략 3 배의 전력을 사용하여, 4,600 W의 전력을 필요로 한다.^[4] 이는 위성의 대용량화와 고 출력화를 바탕으로 한 성능 향상을 위한 것이다.

무궁화위성 3호의 전력계 서브시스템은 태양전지판, 배터리, 전력조절부로 구성되며, 태양전지에서 생산된 전력은 전력조절부에서 70 V의 전압으로 제어된다. North와 South의 태양전지판은 각각 필요한 전력과 전압을 얻기 위하여 태양전지가 직병렬 연결된 태양전지 회로로 구성된다. 이후에 설명할 태양전지 회로는 간략히 태양전지라고 한다.

2.2 태양전지 분석

정지궤도 통신위성에서 태양전지는 궤도환경에 따른 온도변화 등 환경변화에 따라 그 특성이 달라지므로 태양전지 시뮬레이터의 제작을 위해서는 태양전지 특성에 대한 분석이 필요하다. 태양전지의 자세한 해석은 태양전지의 종류, 제조방법에 따라 달라지고, 같은 태양전지라고 해도 동작온도, 태양의 입사각, 설계 및 제조방법으로 인한 감쇄정도와 방사능 효과에 의한 감쇄정도에 따라 달라진다.^[6]

본 연구에서 태양전지 해석의 목적은 위성의 궤도환경과 감쇄효과에 따른 영향을 고려하여 태양전지 시뮬레이터를 구현해 주기 위함이다. 태양전지의 전압과 전류의 특성곡선인 V-I (voltage versus current) 커브에 대한 해석은 잘 알려져 있으며,^[6] 아래의 식과 같이 지수함수적인 특성을 갖는다.

$$I = I_{sk} - V_{oc} e^{-\alpha(V - V_{oc})} \quad (1)$$

여기서 I 는 출력전류, I_{sk} 는 최대 출력전류, V 는 출력전압, V_{oc} 는 최대 출력전압을 나타내며 α 는 궤도환경에 따른 태양전지에 특성을 나타낸다.

무궁화위성 3호의 경우 태양전지 회로가 최대 70 VDC에서 280 W를 공급할 수 있어야 하므로, $I_{sk} = 4$ A, V_{oc} 는 80 V, 최대전력 260 W인 태양전지 시뮬레이터를 개발하고자 한다. 따라서, 위 특성을 만족하는 α 를 구하여 V-I 커브를 보이면 그림 1과 같다.

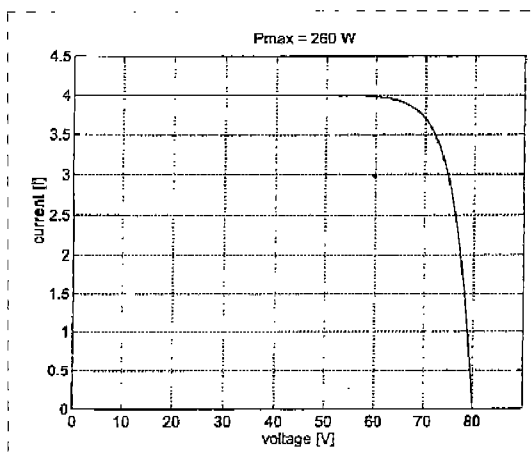


그림 1 $V_{oc}=80$ V, $I_{oc}=4$ A, $P_{mp}=260$ W인 경우 태양전지의 V-I 커브

그림 1에서 전압조정장치의 출력인 버스전압이 무궁화위성 3호와 같은 70 V가 되면 출력전류는 대략 3.7 A, 출력전력은 대략 260 W가 된다.

III. 태양전지 시뮬레이터

태양전지 전원 시뮬레이터는 2 장에서 해석한 태양전지의 V-I 커브를 구현하는 전원회로이다. 태양전지 시뮬레이터의 제작시 동작구간은 출력전류 0 - 4 A, 출력전압 0 - 80 V로 설계하였다.

3.1 시뮬레이터 구성

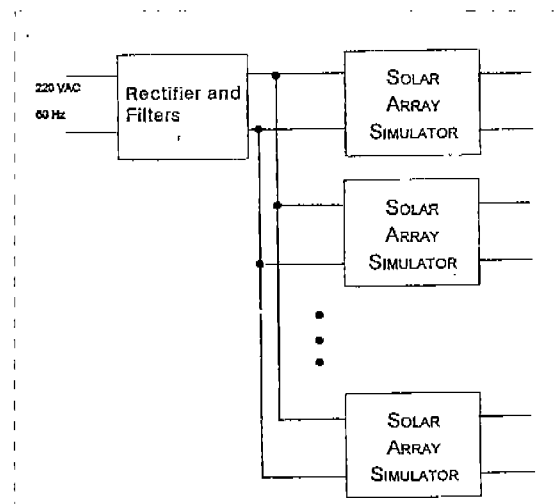


그림 2 태양전지 시뮬레이터 블록 다이어그램

태양전지 전원 시뮬레이터의 블록 다이어그램은 그림 2와 같이 정류회로와 필터로 구성된 직류 전원장치와 12 개의 시뮬레이터 모듈로 구성되어 있다.

3.2 제어기의 구성

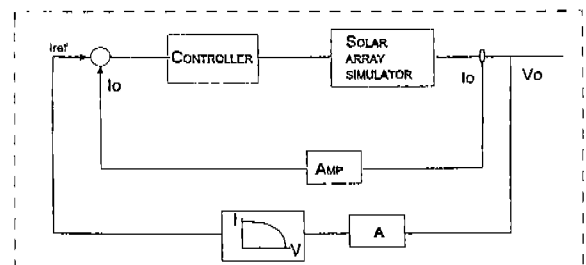


그림 3 제어기 구성

태양전지 전원 시뮬레이터의 제어기 구성은 그림 3과 같다. 그림 3에서 출력전류 I_o 는 출력전압 V_o 을 센스(sense)한 후 V-I 커브로부터 I_{ref} 를 구하여 제환제어해 주는 방식이다. 그림 3의 블록 다이어그램에서 기준전압 I_{ref} 는 정해진 값이 아니라 출력전압에 따라 변동함을 알 수 있다. 이는 부하의 변동에 따라서 출력전압 V_o 가 변동하면 기준전압 I_{ref} 의 값이 변동하기 때문이다.

3.4 V-I 커브의 설계

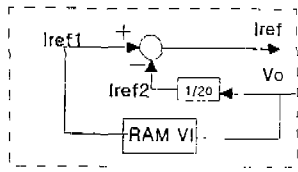
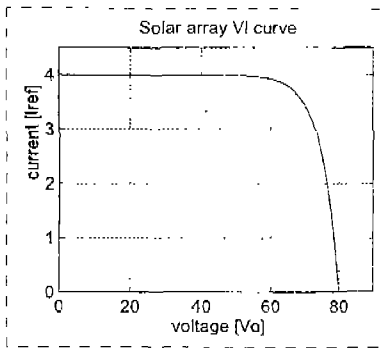
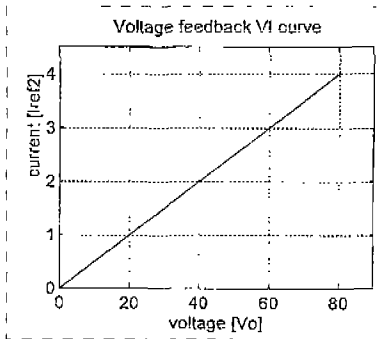


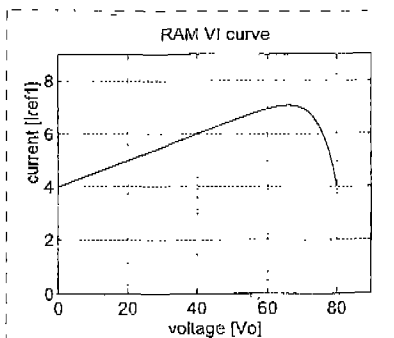
그림 4 I_{ref} 를 얻는 알고리즘



(a) 태양전지의 VI 커브



(b) V_o 궤환 커브



(c) RAM의 VI 커브

그림 5 제안된 VI 커브 계산

그림 3의 태양전지 시뮬레이터 블록 다이어그램에서 V-I 커브는 실제의 경우 RAM에 저장된다. 그런데 태

양전지의 전압은 아나로그 값이므로 출력전압을 디지털 값으로 변환한 후 RAM의 VI 커브를 읽은 후 출력을 아나로그 값으로 변환해 주어 I_{ref} 를 발생해 주어야 한다.

이 경우 RAM의 전후에 AD 변환기와 DA 변환기를 각각 사용하면 되는 데 실제의 경우 AD 컨버터는 지연시간이 존재하므로 이를 고려해 주어야 한다.

본 논문에서는 I_{ref} 의 지연 변동분을 최소화하기 위하여 그림 4와 같은 알고리즘을 사용하였다. 그림 4에서 I_{ref} 의 전체지연 성분 중 I_{ref1} 에 해당하는 성분만 지연되며 I_{ref2} 성분은 지연되지 않으므로 AD 컨버터로 인한 지연을 최소화시킬 수 있다.

그림 4에서 I_{ref} 를 얻는 과정을 그림으로 나타내면 그림 5와 같다. 그림 4와 그림 5에서 I_{ref} 는 시뮬레이터에서 구현하고자 하는 V-I 커브로서 그림 5의 (a)와 같으며 이 값을 RAM 출력값 I_{ref1} 과 출력전압과 비례하는 일정한 값 I_{ref2} 즉,

$$I_{ref2} = V_o \times (I_{sh} / V_{oc}) \quad (2)$$

를 뺀 값이 된다.

따라서, RAM V-I 커브는 그림 5(a)의 V-I 커브에 식 (2)인 그림 5(b)의 합이 되어 그림 5(c)와 같다. 그림 5에서 시뮬레이터 V-I 커브 I_{ref} 인 (a)와 RAM 출력값 I_{ref1} 인 (c)를 비교하면 출력전압에 대해 전류가 많이 변동하는 구간의 경우 I_{ref} 는 출력변화에 대해 급격히 변동하지만 I_{ref1} 은 그 기울기가 감소하여 급격히 변동하지 않는 특징이 있다.

IV 태양전지 시뮬레이터 설계

태양전지 시뮬레이터의 설계는 크게 직류전원장치, 태양전지 시뮬레이터 전력회로 및 제어기 회로 설계로 나뉘어진다. 또한 컴퓨터에서 명령을 주는 태양전지 V-I 명령부와 시뮬레이터의 상태를 표시해주는 모니터링부의 설계가 있다.

4.1 직류 전원장치

직류전원 장치는 12 개의 태양전지 시뮬레이터의 입력에 직류전압을 공급하여 주는 장치이다. 무궁화 3호에서 전압조절장치의 출력전압은 DC 70 V이므로 직류전원장치의 출력전압은 90 V로 설계하였다.

4.2 시뮬레이터 모듈

그림 2는 시뮬레이터 전력회로의 구성을 나타낸다. 그림 2에서 12 개의 시뮬레이터 모듈은 각각 동일한 특성을 갖으며 정지레도 통신위성 전압조절장치에 태양전

지를 대신할 입력으로 사용될 예정이다. 시뮬레이터의 각 모듈은 전력회로부와 제어부로 구성된다.

또한, 12 개의 태양전지 시뮬레이터 모듈에 대한 V-I 커브 명령을 컴퓨터를 통해서 송신받고 시뮬레이터 각각의 출력전압과 출력전류는 컴퓨터로 모니터링하기 위해 인터페이스 보드를 갖는다.

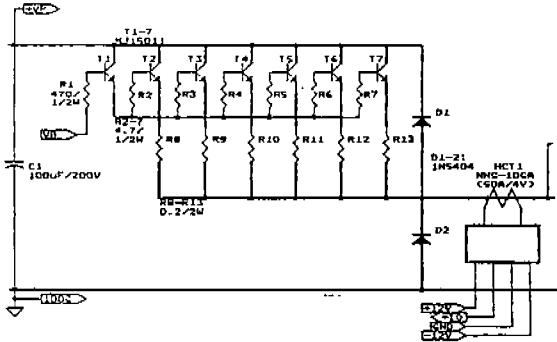


그림 6 시뮬레이터 모듈에 대한 전력회로

그림 6은 태양전지 시뮬레이터 한 개의 모듈에 대한 전력회로를 나타낸다. 그림 6에서 보는 바와같이 전력회로의 증폭기는 트랜지스터와 다이오드의 구성으로 이루어진다. 트랜지스터는 제어기 회로에서 전달된 전압 V_B 가 연결된 한 개의 트랜지스터(T1)에서 전류를 증폭한 후 여섯 개의 트랜지스터의 베이스에 전류를 공급한다.

4.3 제어기 회로의 구성

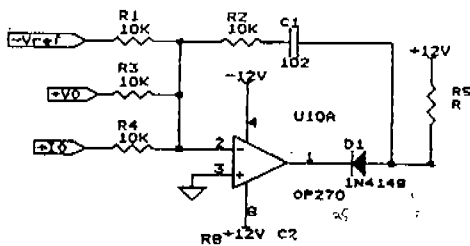


그림 7 제어기 회로

태양전지 시뮬레이터 모듈의 제어기의 구성은 크게 제어기(Controller), 전력회로(Solar array simulator), 전류 제한 루프 및 전압제한 루프로 구성된다. 전력회로는 그림 6에서 설명한 바와같이 트랜지스터로 구성된 증폭기 회로이다. 그림 3의 제어기 회로에서 Amp는 전류센서의 이득을 나타낸다. 전압제한 루프는 A와 VI 커브로 구성된다. 여기서 A는 전압센서의 이득을 나타낸다.

그림 3의 제어기에서 Controller의 구성은 그림 7과 같다. 그림 7에서 $-V_{ref}$ 는 그림 4의 제안된 방식에 대

한 RAM 출력 기준전류 I_{ref1} 를 나타내며, V_o 는 출력 전압에 대한 전압값인 I_{ref2} 를 나타낸다. I_o 는 출력전류를 제어하기 위한 전류이다. 그림 7에서 V_{ref} 가 음수로 표시된 것은 선형증폭기의 이득이 음이 되기 때문이다.

AD 컨버터의 지연시간을 무시한 경우 제어회로의 1 단 증폭기에 대한 제어기 특성을 구하면 다음과 같다. (단, 양의 이득으로 환산된 값임)

$$A_c(s) = \frac{sCR_2 + 1}{sCR_1} \quad (3)$$

식 (3)에서 보는 바와 같이 제어기는 한 개의 폴(Pole)과 한 개의 제로(Zero)를 갖으며 제로의 주파수는 영으로 직류에서 이득은 매우 크며, 폴 주파수인 차단주파수는 100 kHz이다. 그림 3의 출력은 2 차 증폭기로 연결되는 데 2 차 증폭기의 이득은 대략 13이 된다. 한편, AD 컨버터는 변환시간이 매우 빠른 8 bit Video 형 소자(Flash type 컨버터)인 AD9048을 선정하였으며, 컨버터의 AD 변환 지연시간은 약 1 μ sec가 된다.

4.4 V-I 커브 명령 및 텔레메트리부

그림 8은 태양전지 시뮬레이터의 I_{ref1} 의 명령을 계산하는 V-I 커브를 나타낸다. 그림 8에서 V-I 커브는 $\alpha = 0.215$, 최대전압 $V_{oc} = 80$ V, 최대전류 $I_{sh} = 4$ A에 대한 I_{ref1} 을 나타낸다.

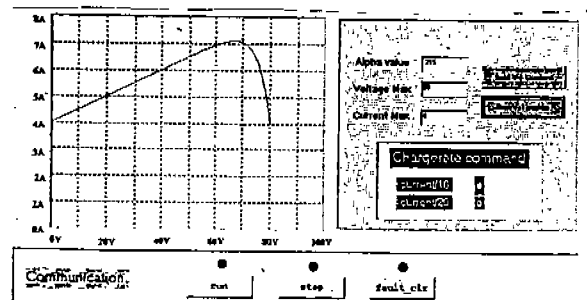


그림 8 Command 화면

계산된 V-I 커브를 RAM에 보내려면 그림 8의 SEND를 누르면 된다. SEND를 누르면 정해진 커브는 태양전지 전원 시뮬레이터에 있는 각 RAM에 보내진다. 한편, 태양전지 시뮬레이터의 동작은 이후 RUN를 클릭하여 동작시킬 수 있다. 만일 시뮬레이터의 동작 중 이상상태(Fault)가 발생되면 시스템의 동작이 차단되는 데 이때 Fault_status를 보면 그상태를 알 수 있다.

태양전지 시뮬레이터 상태의 모니터링은 직류전원 장치의 출력전압과 출력전류 display와 태양전지 시뮬레이터 모듈의 출력전류, 출력전압 display로 나뉘어져

있다.

V. 실험결과

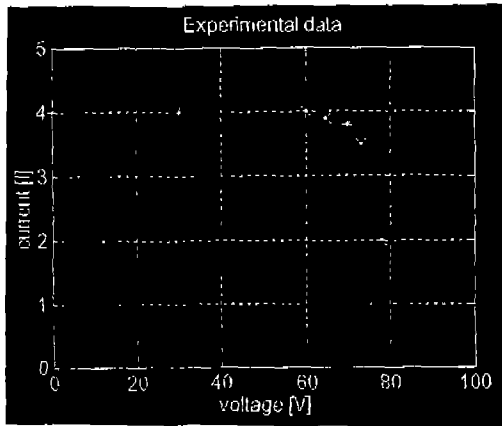


그림 9 V_I 의 최대전압 80 V, 최대전류 4 A, $\alpha = 0.217$ 에 대한 실험결과

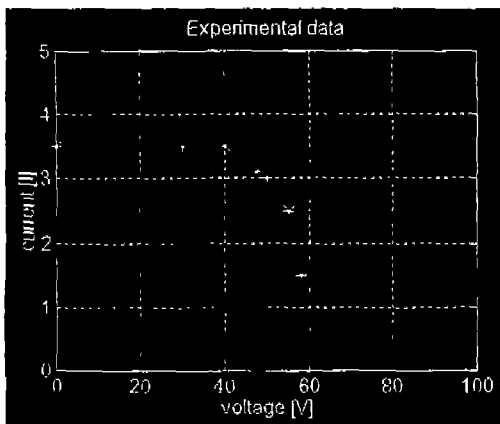


그림 10 V_I 의 최대전압 60 V, 최대전류 3.5 A, $\alpha = 0.217$ 에 대한 실험결과

태양전지 전원 시뮬레이터의 실험은 크게 직류 전위 장치의 실험과 태양전지 시뮬레이터 모듈의 실험으로 나누어 진다.

그림 9와 10은 출력이 저항 부하인 경우에 대한 시뮬레이터 모듈의 V_I 특성 커브를 나타낸다. 그림 9는 V_I 커브 명령이 최대전압 80 V, 최대전류 4 A, $\alpha = 0.217$ 인 경우에 대한 V_I 커브의 실험파형을 나타내며, 그림 10은 V_I 커브 명령이 최대전압 60 V, 최대전류 3.5 A, $\alpha = 0.217$ 인 경우에 대한 실험파형을 나타낸다. 그림 9와 그림 10에서 보는 바와같이 V_I 커브의 출력은 태양전지 V_I 명령과 거의 같음을 알 수 있다.

VI 결론

본 논문에서는 태양전지 특성을 갖는 태양전지 시뮬레이터에 대한 개발로 시뮬레이터를 해석, 모델링, 설계, 제 및 실험을 하였다. 본 논문에서 수행된 연구의 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 태양전지 시뮬레이터를 설계하기 위한 주어진 데이터에 위한 간략화된 태양전지의 모델링 해석
- 정지궤도 통신위성용 전력계 서브시스템에 활용할 수 있는 태양전지 시뮬레이터의 설계 및 개발
- 태양전지 시뮬레이터의 하드웨어에 대해 V_I 커브의 변동을 고려한 V_I 커브 명령을 할 수 있는 소프트웨어의 설계

본 논문에서 개발한 태양전지 시뮬레이터는 저궤도용 태양전지 시뮬레이터의 개발에 활용될 수 있으며, 전력용량이 적은 경우 개발된 태양전지 시뮬레이터를 활용할 수 있다.

참고문헌

- [1] 김성규외, 위성 BUS 시스템 기술지원 및 개발연구, 한국항공우주연구소, 1995.
- [2] 최재동, 마근수, 남문경, "스위칭 방식을 갖는 인공위성 전압 분류조절기 디자인 고려," 전기학회, 추계학술대회 논문집, pp. 320 - 322, 1996.
- [3] 정 규 범, 김 성 규, 황보 한, 무궁화 위성체 전압조절장치 모델링, 대한전기학회 하계 학술회의,
- [4] 황보 한, 김성중, 박정우, 이재인, "무궁화 위성 3호의 버스 시스템 설계," 항공우주학회 추계 학술발표대회, pp. 641-650, 1997.
- [5] 장성수, 장진백, 심은섭, "An Overview of Energy Balance Analysis of KOMPSAT Electrical Power System," 항공우주학회 추계 학술발표대회, pp. 586-589, 1997.
- [6] W. J. Larson and J. R. Wertz, Space Mission Analysis and Design, Microcosm, Inc. and Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [7] J. R. Lee, Analysis and Simulation of Dynamic of Spacecraft Power Systems, VPI & SU, USA.
- [8] H. S. Rauschenbach, Solar Cell Array Design Handbook, Van Nostrand Reinhold Company, 1980.