

최악조건을 고려한 태양전지 어레이 션트 전압조절기

崔 載 東[†]

A Solar Array Shunt Switching Unit Considering Worst Case Analysis

Jae-Dong Choi

요 약

본 논문은 정지궤도 위성을 위한 완전조절방식을 갖는 태양전지 어레이 션트 전압조절기를 나타낸다. 스위칭 션트 전압조절기는 태양전지 어레이 전력을 조절하는 어레이 스위치 모듈들로 구성된다. 이러한 태양전지 어레이 션트 모듈들은 스위칭을 통해 버스에 태양전지 회로가 접속되거나 분리되며, 단지 FPGA 로직변경 만을 통해 이전의 회로설계로부터 간단하게 확장이 가능하다. 제안된 설계회로를 검증하기 위해 제어로직 및 최악조건해석이 수행되었으며, 시뮬레이션 및 실험결과를 보여준다.

ABSTRACT

This paper presents development of solar array shunt switching unit with a fully regulated power regulation for Geostationary Earth Orbit(GEO) satellite. This shunt switching unit comprises the solar array shunt modules that regulate the solar array power. These solar array shunt modules connect/disconnect the solar array segments to/from the bus through switching actions. And that is also possible simply extension to an existing design by FPGA control logic changing. In order to verify the proposed design, the control logic and worst case analysis are analyzed and the simulation and experimental results are shown.

Key Words : Geostationary Earth Orbit Satellite, solar array shunt switching unit, power regulation

1. 서 론

정지궤도 통신위성(Geostationary Earth Orbit : GEO)의 션트 스위칭 전압 조절기는 임무기간 동안 태양전지로부터 발생하는 전력의 조절 및 제어기능을 제공한다^[1-3]. 션트 스위칭 전압조절기의 스위치들은 잉여 전력 발생시 션트 스위치의 온 혹은 오프 동작을 통해 일정한 버스전압을 유지하게 되며, 스위칭의 상승과 하강시간은 전도와 방사 노이즈에 대한 레벨을 최소화하기 위해 dv/dt 에 의해 제한된다. 션트전압조절기의 제어회로는 태양전지 어레이로부터 발생하는 전력을 제

한된 범위내의 버스전압으로 유지하기 위한 조절기능을 갖는다. 이러한 기능을 갖는 정지궤도용 전압조절기의 경우 저궤도위성과 달리 낮 기간과 태양에너지를 이용할 수 없는 식기간이 길게 나타나 우주환경요소에 상당한 영향을 받게 되며, 특히 12년 이상의 임무수명을 갖는 정지궤도위성은 임무초기 및 임무말의 부품 한계허용오차, 온도 및 방사에너지에 대한 영향을 고려해야 한다. 따라서 한계조건을 포함한 최악조건 해석은 설계결과가 안정적인지를 확인하는 것이다^[4-5]. 초기 허용한계, 온도 영향, 우주방사영향, 임무말 허용한계등과 같은 모든 변화하는 조건 속에서도 설계된 회로는 임무기간 동안 지정된 규격 내에서 동작해야 하는 것이다^[6-8].

본 연구에서는 임무기간동안 일정한 버스전압을 유지할 수 있는 정지궤도용 디지털 션트 스위칭 전압조

[†]교신저자 : 정회원, 한국항공우주연구원 선임연구원

E-mail : jdchoi@kari.re.kr

접수일자 : 2005. 2. 21

2차 심사 : 2005. 7. 12

1차 심사 : 2005. 5. 12

심사완료 : 2005. 7. 19

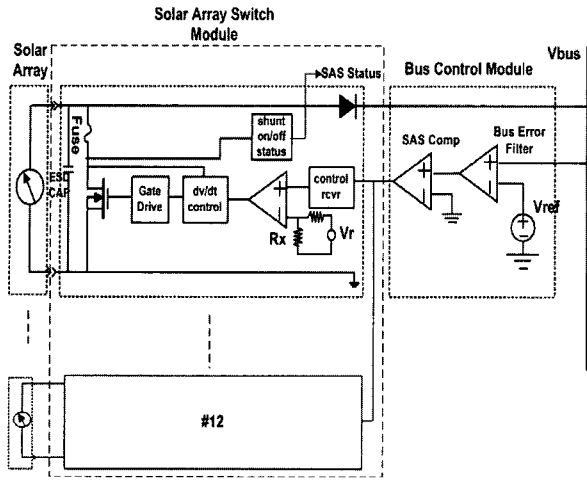


그림 1 태양전지어레이 션트 스위칭 전압조절기의 블록 다이어그램

Fig. 1 Solar Array Shunt Switching Unit block diagram

절기가 제안되었다. 경 부하로부터 중 부하에 이르는 부하 변화에 버스전압 변동을 제한범위 내에서 보다 간편하게 제어하기 위해 스위칭 방식과 모듈방식이 사용되었다. 각 스위치 제어모듈은 제어 및 확장의 용이성을 위해 FPGA(Field Programmable Gate Array)가 사용되었으며 임무말까지 각 부품의 허용한계치를 고려한 최악조건 및 안정도가 분석되었다. 또한 션트 스위칭 전압조절기의 부하변동에 따른 스위칭 동작특성이 시뮬레이션 되었다. 션트 스위칭 전압조절기의 시험검증을 위해 입력전원으로 태양전지 I-V특성을 모사하는 태양전지 어레이 시뮬레이터가 사용되었으며 연동시험을 통해 버스전압의 안정도를 확인하였다.

2. 태양전지 어레이 션트 스위칭 전압조절기

2.1 동작특성

태양전지 어레이 션트 스위칭 전압조절기(Solar Array Shunt Switch Unit : SASSU)는 태양전지 어레이와 연결된 션트 스위칭 동작에 의해 버스전압을 조절하는 장치이다.

본 연구에서 개발된 SASSU는 12개의 복쪽 모듈과 남쪽모듈로 각각 구성하였으며, 각 션트 모듈에는 135 W 용량을 갖는 2개의 션트 스위치가 태양전지 어레이 회로와 연결 되었다. 그림 1의 션트 스위칭 전압조절기는 낮 기간 동안 버스전압이 규정된 범위 이상으로 상승 시 션트 스위치를 “온” 함으로써 버스전압 상승을

억제하며, 이와 반대로 태양전지 어레이 발생전력이 적거나 부하가 중부하일 경우 발생전력의 대부분을 부하로 공급하기 위해 션트스위치를 “오프” 하여 다이오드를 통해 부하에 전력을 공급한다.

스위치 제어상태는 버스 제어기 모듈(BCM:Bus Control Module)에 의해 결정된다. 제어회로는 버스전압 검출회로로부터 발생된 제어 신호들을 받아 션트스위치의 “온” 혹은 “오프”상태를 결정하여 구동회로에 전달하게 된다. 부하요구 전력이 큰 기간 동안 태양전지 어레이 스위치는 직렬 접속된 다이오드를 통해 보다 많은 수의 태양전지 어레이가 접속되어 발생 전력을 공급하게 되며, 이와 반대로 경부하시에는 보다 적은 수의 스위치가 어레이에 연결된다. 버스에 접속하기 위한 어레이의 수는 버스 제어기에서 검출된 션트 스위치 제어전압에 의해 결정된다.

2.2 SASSU 제어로직 분석

BCM의 오차검출증폭기에서는 버스 입력 전압으로부터 1/5의 이득 값이 오차입력 값이 되며, 이 값은 +10V 기준전압과 비교된다. 비교결과 발생된 신호는 보상증폭회로로 전달되며, 보상증폭회로는 0~+3.28V사이의 제어신호가 제공된다. 보상기를 통하여 보상된 제어신호가 각 션트 스위치 모듈에 위치한 FPGA에 입력된다. 이때 부하와 션트 전류사이의 스위치는 완전한 “온” 혹은 “오프” 동작을 하지만, 정밀한 버스전압 제어를 위해 태양전지 어레이 전력과 부하에서 요구되는 전력의 균형점에 해당하는 스위치는 항상 PWM 스위치 동작을 한다. 따라서 버스 전압 리플은 수십 Hz에서 2.0kHz까지 수 백mV의 범위를 갖는다.

그림 2는 버스전압조절을 위한 전류조절 사이클을 보여준다. 전류 조절은 버스전압과 함께 단방향으로 증가하고, 제어기는 비선형 컨덕턴스처럼 동작한다. 태양전지 어레이 전류증가 혹은 부하전류 감소에 의해 버스전압이 증가할 때 전체 조절 전류는 증가하게 된다. 먼저 버스전압이 V_{B0} 보다 클 때 션트전압 조절모드에 있으며 버스전압을 조절하기 위해 제어된다.

그림 2와 표 1에 제시된 것처럼, 실제 션트전류는 근사적으로 0.1V사이의 제한 사이클 값을 갖는다. 두개의 인접한 태양전지 어레이 스위치들의 전류 임계 값들 사이의 전압 차는 $V_{hh} = V_{hi+1} - V_{li}$ 로 표현되며, 히스테리시스의 폭은 $V_{hl} = V_{hi+1} - V_{hl}$ 에 의해 획득될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 이웃한 두 개 스위치의 오차 기준 전압 차가 0.4V로 설정되었으며 이때 션트스위치 사이의 임계값 분해능은 $0.4 \pm 0.188V$ 가 된다. 24개의 스위치 모두가 “온”이 될 경우 그 값은 표 1과 같이 9.6V

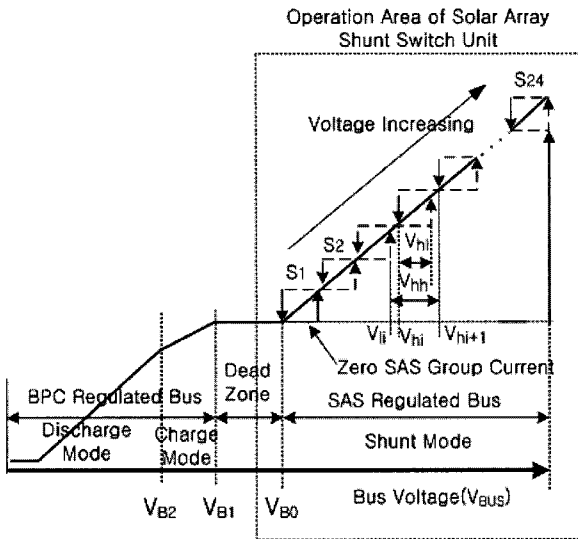


그림 2 전체조정전류에 대한 버스전압 변화
Fig. 2 Bus voltage variation for total regulated current

가 된다. 따라서 이 값이 기준전압 +10V와 비교되어 오차전압을 결정하게 되며 각 스위치에서 제어되는 전류값은 2.7A가 된다. 표 1은 임계전압에 따른 SASSU 스위치의 온 및 오프 상태를 나타낸다. 그림 2의 제어 회로에서 버스전압이 0.4V 증가 마다 각 태양전지 어레이 회로에 연결되어있는 스위치가 차례로 온 되어 섀트동작을 함으로서 버스전압을 조절하게 된다. 이때 초기 1번스위치, S1의 제어영역은 초기 턴-온 임계값 0~0.4V가 되며, 2번 스위치, S2의 제어영역은 0.4~0.8V가 된다.

표 1 임계전압에 따른 SASSU 스위치 온 및 오프 수량
Table 1 Number of on and off for Threshold Voltage

스위치 번호	Turn-on Threshold	Turn-off Threshold	S/A 회로 전류(A) @ 50V	S/A 전류 (A)
1	0.4	0.1	2.7	64.8
2	0.8	0.5	2.7	62.1
3	1.2	0.9	2.7	59.4
4	1.6	1.3	2.7	56.7
5	2.0	1.7	2.7	54
...
20	8.0	7.7	2.7	13.5
21	8.4	8.1	2.7	10.8
22	8.8	8.5	2.7	8.1
23	9.2	8.9	2.7	5.4
24	9.6	9.3	2.7	2.7

태양전지 어레이들로부터 버스로 전달되는 k번째 전력에 대해 다음과 같은 방정식으로 주어진다.

$$P_A = V_{BUS} \cdot L \left(\sum_{j=k}^{24} I_{SACj} - D \cdot I_{SACk} \right) \quad (1)$$

여기서, I_{SAC} 는 j번째 태양전지 어레이 회로로부터 버스로의 전류, D는 회로에서 섀트 듀티비, L은 태양에너지 조사인자 ($0 < L < 1$), 그리고 V_{BUS} 는 버스전압 값을 나타낸다.

3. 제어회로의 안정도 및 최악조건분석

정지궤도 위성의 임무수명은 대부분 수명 12년 이상 이므로, 일부 부품실패 시에도 임무 말까지 안정한 이득과 위상여유를 갖도록 설계하여야 한다. 또한 설계된 회로는 우주방사선 효과 및 온도영향에 의해 성능이 일부 저하되더라도 임무말 성능요구조건을 만족할 수 있어야 한다.

본 절에서는 각 제어보상회로에서 일부 부품 실패시 안정도 및 최악조건에서의 제어기 안정도가 분석되었다.

3.1 버스전압 검출회로의 입출력특성

그림 3은 제안된 버스전압조정기 전압 검출회로이다. 그림 3에서 C02는 4개의 커패시터가 병렬 연결된 P-Quad 형태이며, R10은 4개의 저항기가 H형태로 구성된 H-Quad 방식으로 설계되었다.

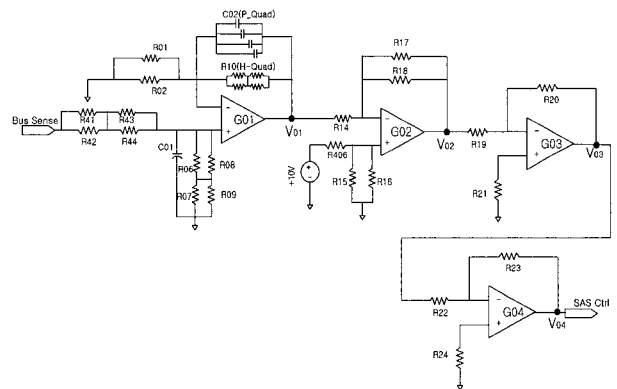


그림 3 버스전압조정기 버스 검출회로도
Fig. 3 Bus sensing circuit of bus controller

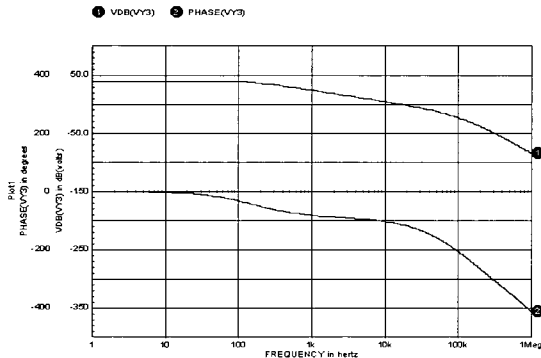
버스전압검출기 보상회로의 주파수 응답특성은 그림 4와 같다. 그림 4(a)는 버스전압검출회로의 주파수 응답특성이다. 그림 3에서 C02(P-Quad) 커패시터는 C201,

C202, C203, C204로 구성된 P-Quad 형태의 뒤집 보상 회로로서 이중 임무기간 동안 커패시터 C201이 실패한 경우에 대해 그림 4(b)에 주파수 응답특성을 보여준다. 그림 3에 대한 입출력 특성을 구하면 식 (2)와 같다.

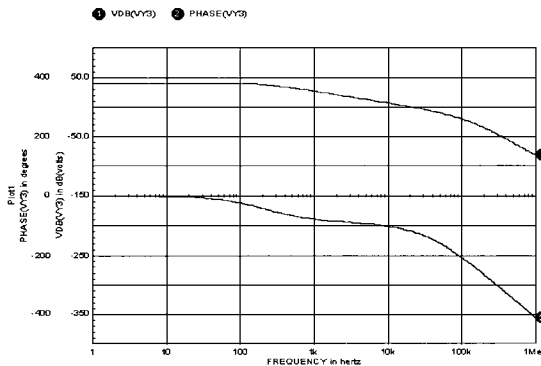
$$A_1 = \frac{E_o}{E_i} = \left[\frac{R_{10}(R_1 + R_2)}{R_1 \cdot R_2} \right] \left[\frac{R_{17} \cdot R_{18}}{R_{14}(R_{17} + R_{18})} \right] \left[\frac{R_{20} \cdot R_{23}}{R_{19} \cdot R_{22}} \right] \left[\frac{1}{1 + sC_2 R_{10}} \right] \quad (2)$$

$$C_2 = C_{201} + C_{202} + C_{203} + C_{204}, \quad R_{10} = R_{101} // R_{102} + R_{103} // R_{104}$$

태양전지 어레이 버스전압의 동작구간인 저주파 영역에서 이득을 크게 하여 정상상태의 성능을 향상시키도록 하였다.



(a) 정상상태 (C2=100n)



(b) 일부실패 시 (C2=75n)

그림 4 버스전압 오차검출회로 주파수 응답특성
Fig. 4 Bus voltage error to bus transfer function

3.2 SAS 제어보상회로의 특성분석

본 연구에서 태양전지 어레이 전압조절기 제어보상회로는 위상 앞섬 회로를 통해 위상 앞섬 각을 추가하여 이득교차주파수에서의 위상여유를 증가시켰으며, 위상 뒤집 부분에서는 태양전지 어레이 버스전압이 동작

하게 되는 저주파 영역에서 이득을 크게 하여 정상상태의 성능을 향상시키도록 하였다. 설계된 보상회로는 그림 5와 같다.

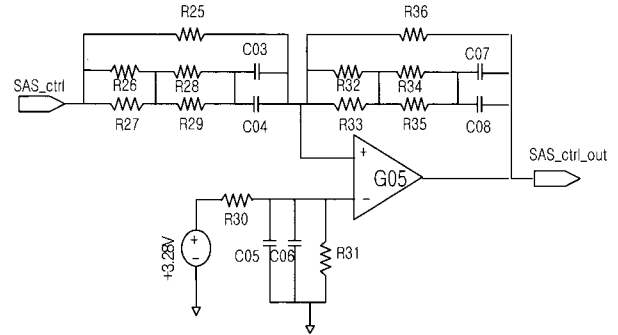


그림 5 태양전지 어레이 션트조절기 제어보상회로
Fig. 5 Compensated bus controller of a solar array shunt assembly

SAS보상회로의 입출력 식은 식 (3)과 같으며, 주파수 응답특성곡선은 그림 6과 같다.

$$AB = [R'] \frac{C_2 C_3 R_1 (R_2 + R_3) s^2 + (R_2 + R_3) C_3 + C_2 R_3 s + 1}{(C_2' C_3 R_1 (R_2 + R_3) s^2 + C_2' R_1 (R_2 + R_3) s + C_2 R_3) s^2 + (C_2 R_3 + C_2' R_3) s + 1} \quad (3)$$

$$R' = \left[\frac{R_{10}(R_1 + R_2)}{R_1 \cdot R_2} \right] \left[\frac{R_{17} \cdot R_{18}}{R_{14}(R_{17} + R_{18})} \right] \left[\frac{R_{20} \cdot R_{23}}{R_{19} \cdot R_{22}} \right] \cdot \left[\frac{R_{36}}{R_{25}} \right]$$

$$R_{32}' = R_{32} + R_{36}, \quad C_2' = C_2 C_3$$

그림 6의 응답특성곡선에서 보여주는 바와 같이 설계된 SAS 보상회로의 위상여유는 76°이며, 이득 값은 17dB로 요구되는 최소위상여유와 이득마진 값을 만족함을 알 수 있다.

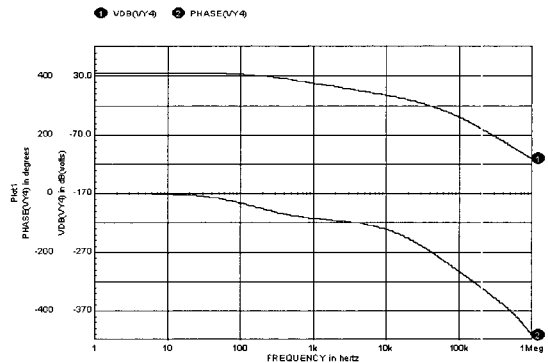


그림 6 버스전압조절기 SAS 보상회로 응답특성
Fig. 6 SAS control signal to compensated bus error transfer function

그림 5의 보상회로에서 입력력 커패시터 중 그림 7은 커패시터 C03의 실패에 대한 응답특성, 그림 8은 커패시터 C03 및 C07 모두 실패경우에 대한 응답특성결과이다. 각각의 그림에서 보여주는 것처럼 임무기간동안 커패시터와 저항기의 실패가 발생할지라도 위상여유와 이득 요구조건을 만족함을 알 수 있다.

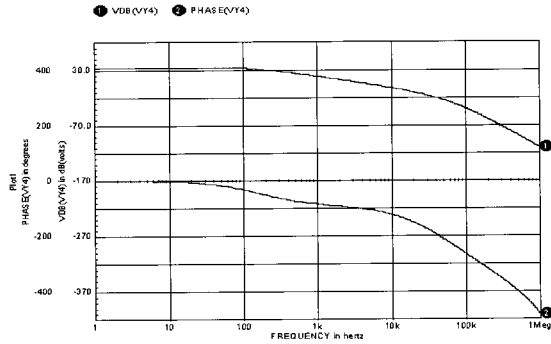


그림 7 커패시터 C03 fail시 SAS 보상회로 응답특성
Fig. 7 SAS compensation versus component C03 Failures

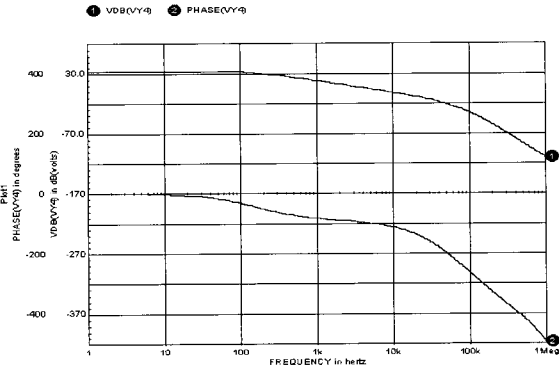


그림 8 C03, C07 모두 Fail시 SAS 보상회로 응답특성
Fig. 8 SAS compensation versus component C03, C07 Failures

3.3 최악조건해석

버스전압검출회로의 최악조건을 얻기 위해 그림 3에서 사용된 소자들의 최악조건에서의 부품허용오차를 살펴보면 표 2와 같다. 표 2로부터 각 소자들의 최악조건을 적용하여 앰프출력전압, V_{01} 을 구하면 식 (4)~(8)과 같다.

$$V_{01} = \left(\frac{R_1' + R_{10}}{R_1'}\right) V_{R6}' = \left(\frac{R_1' + R_{10}}{R_1'}\right) \left(\frac{R_6'}{R_4' + R_6'}\right) V_{in} \quad (4)$$

$$V_{R6}' = \left(\frac{R_6'}{R_4' + R_6'}\right) V_{in} \quad (5)$$

표 2 최악조건 부품 허용오차

Table 2 Assumed Worst Case Component Variations

REFDES	Nominal Value	Initial tol.	Temp. Coeff.	End of life tol.
C01,02,04,10	100pF,50V	10%	15%	30%
C03,07	SELECT	10%	15%	30%
C5,6,8	330pF,50V	10%	15%	30%
R1,2,4,5,17	100K	±1%	±5ppm/°C	± 0.1%
R3,6,9,11,12,13,14,20,24,25,30,31,36,39,40,406	10.0K	± 1%	±5ppm/°C	± 0.1%
R7,8,10,28,29,38,42,	SELECT	±1%	±5ppm/°C	± 0.1%
R15,16,18,26,27	100K	±1%	±5ppm/°C	± 0.1%
R19,21,22,23,32,33,34,35	1.00K	±1%	±5ppm/°C	± 0.1%
R37	4.99K	±1%	±5ppm/°C	± 0.1%
R30	4.70K	±1%	±5ppm/°C	± 0.1%
R41	80.6K	±1%	±5ppm/°C	± 0.1%
R43	25.5K	±1%	±5ppm/°C	± 0.1%

$$R_4' = R_1', R_6' = R_{10}, R_1' = R_1 // R_2, R_4' = R_4 // R_5$$

$$\text{따라서, } V_{01} = \left(\frac{R_{10}}{R_1'}\right) V_{in} \quad (6)$$

예상되는 최대값과 최소값은 다음과 같다.

$$V_{01max} = \left(\frac{R_{10max}}{R_{1min}'}\right) V_{in} = \left(\frac{10.113K}{49.435K}\right) V_{in} = 0.2046 V_{in} \quad (7)$$

$$V_{01min} = \left(\frac{R_{10min}}{R_{1max}'}\right) V_{in} = \left(\frac{9.8871K}{50.56K}\right) V_{in} = 0.1955 V_{in} \quad (8)$$

따라서, 식 (7)~(8)로부터 입력전압이 50V라고 가정할 때 버스전압 검출부의 첫 번째 앰프의 출력전압 최대값은 $V_{01max} = 10.228V$ 이며, 최소값은 $V_{01min} = 9.775V$ 로 나타난다. 이 값은 임무초기 저항의 초기제한허용오차 값이 1%일 때의 값이다. 마찬가지로 그림 3의 두 번째 출력앰프의 최대 및 최소값은 다음과 같다.

$$V_{02} = \left(\frac{R_{14}' + R_{17}'}{R_{14}}\right) V_{R15}' = \left(\frac{R_{14}' + R_{17}'}{R_{14}}\right) \left(\frac{R_{15}'}{R_{13} + R_{15}'}\right) V_{01} \quad (9)$$

$$V_{R15}' = \left(\frac{R_{15}'}{R_{13}' + R_{15}'}\right) V_{01} \quad (10)$$

$$V_{02} = \left(\frac{R_{17}'}{R_{14}}\right) (V_{REF} - V_{01}) \quad (11)$$

$$R_{13} = R_{14}, R_{15}' = R_{17}', R_{15}' = R_{15} // R_{16},$$

$$R_{17}' = R_{17} // R_{18},$$

$$R_{14max} = 10.113K, R_{14min} = 9.8871K,$$

$$R_{17max}' = 50.56K, R_{17min}' = 49.435K$$

10V기준전압은 임무말까지 ±20mV 오프셋 값으로

변동된다고 가정한다. 그러므로 기준전압의 최대값 $V_{REFmax} = 10.024 V$ 이며, $V_{REFmin} = 9.98 V$ 가 된다. 이때 출력전압의 최대 및 최소값은 다음과 같다.

$$V_{02max} = \left(\frac{R_{17max'}}{R_{14min}}\right)(V_{REFmax} - V_{01min}) = 1.2733 V \quad (12)$$

$$V_{02min} = \left(\frac{R_{17min'}}{R_{14max}}\right)(V_{REFmin} - V_{01max}) = 1.23 V \quad (13)$$

마지막 출력단의 전압값 V_{03} 및 V_{04} 의 값은 각각 다음과 같다.

$$V_{03max} = \left(\frac{R_{20max'}}{R_{19min}}\right)(V_{02max}) = 13.024 V \quad (14)$$

$$V_{03min} = \left(\frac{R_{20min'}}{R_{19max}}\right)(V_{02min}) = 12.0424 V \quad (15)$$

$$V_{04max} = \left(\frac{R_{23max}}{R_{22min}}\right)(V_{03max}) = 15 V \quad (16)$$

$$V_{04min} = \left(\frac{R_{23min}}{R_{22max}}\right)(V_{03min}) = 15 V \quad (17)$$

그러나 최종 앰프출력값이 최대 133.217V, 최소 117.723V값이 되어 실제앰프의 최대, 최소값인 $\pm 15V$ 로 포화된다. 따라서 식 (14)~(17)의 결과에 의하면 1%의 허용한계치를 갖는 저항 값은 4개의 앰프단을 거친 후 포화 값에 도달되어 원하는 범위 내에 제어될 수 없다. 본 연구에서는 식 (18)~(19)과 같이 0.1%의 허용오차 값을 갖는 정밀 저항을 선택함으로써 최대 및 최소 오차 전압값이 0.0921V의 범위 내에서 제어가 가능하도록 설계 하였다.

$$V_{01max} = \left(\frac{R_{10max}}{R_{1min}}\right)V_{in} = \left(\frac{10.023K}{49.885K}\right)V_{in} = 0.2009 V_{in} \quad (18)$$

$$V_{01min} = \left(\frac{R_{10min}}{R_{1max}}\right)V_{in} = \left(\frac{9.977K}{50.115K}\right)V_{in} = 0.199 V_{in} \quad (19)$$

4. 시뮬레이션 및 실험 결과

그림 9와 그림 10은 7.5A와 15A의 부하조건에서 셉트 전압조절기 스위치의 “온”, “오프” 그리고 “PWM” 상태에 따른 버스 전압조절결과를 나타내는 시뮬레이션 결과이다. 스위치 회로와 연결된 태양전지 어레이 전력원은 각각 병렬로 접속되며, 각 회로의 스위칭을 통해 7.5A와 15A의 부하전류에서 최대 $\pm 0.01V$ 의 리플 전압을 보여준다.

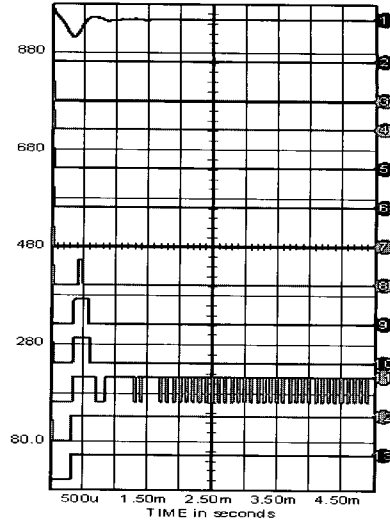


그림 9 7.5A 부하에서의 각 셉트스위치의 스위칭 상태
Fig. 9 Switching state of each shunt switch module at 7.5A load variation

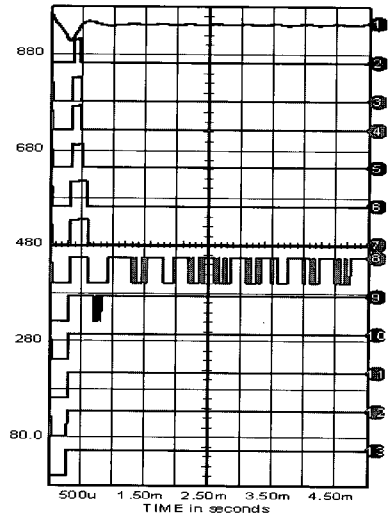


그림 10 15A 부하에서의 각 셉트스위치의 스위칭 상태
Fig. 10 Switching state of each shunt switch module at 15A load variation

먼저 그림 9의 1번 버스전압은 2번부터 13번에 해당하는 12개의 스위치회로의 “온” 혹은 “오프” 그리고 “PWM” 제어를 통해 고정된 레벨로 유지된다. 그림 9에서 11번 스위치에서 PWM제어가 수행되며, 2번부터 10번까지의 스위치가 “온”상태이며, 12번과 13번 스위치가 “오프”상태이다. 이 결과는 입력 태양전지 전력이 부하에서 요구되는 전력보다 생성량이 많아 버스전압이 상승하게 되는 요인이 되므로 스위치를 셉트 시켜

버스전압을 제어하게 된다. 그림 10에서 15A부하요구 조건의 경우 8번 스위치에서 PWM 제어가 수행됨을 알 수 있다. 따라서 그림 10은 보다 많은 부하전력이 요구되므로 스위치 “온” 상태의 수보다는 스위치 “오프” 상태의 수가 많음을 알 수 있다.

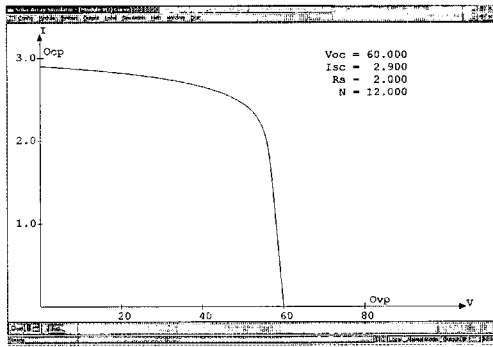


그림 11 Voc=60[V], Ioc=2.9[A]를 갖는 태양전지 어레이 시뮬레이터 I-V 특성 곡선
 Fig. 11 I-V experimental curve of solar array simulator for Voc=60[V], Ioc=2.9[A]

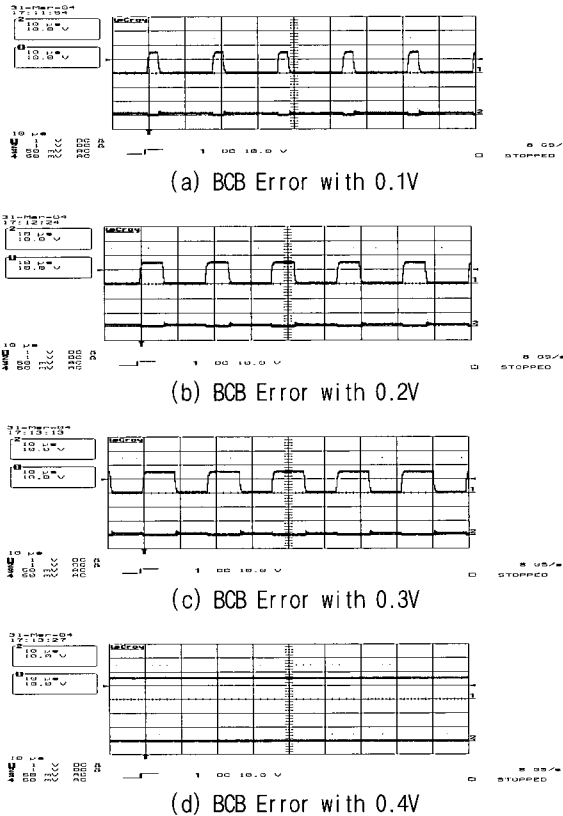


그림 12 버스전압 오차에 의한 SASSU 스위치 듀티 변화
 Fig. 12 SASSU switch duty variation by bus voltage error

초기과도상태에서의 버스전압과 부하전류는 제어회로에 위치한 커패시터들의 충전기간 동안 큰 변동 값을 갖는다. 그러나 이 값은 1.5ms이내에 정상상태 값에 도달한다.

그림 11은 본 실험에 사용된 태양전지 시뮬레이터로서 Voc=60[V], Ioc=2.9[A]의 I-V출력특성 곡선을 보여준다. 그림 12는 그림 5의 제어보상회로에서 발생된 오차 전압이 PWM 스위칭을 위해 듀티비가 0.1V로부터 0.4V까지 변할 때를 보여준다. 이 값은 입력전력과 부하전력의 평형점에 해당하는 스위치에서 듀티비의 변화에 따라 PWM 스위칭 동작을 하게 된다.

그림 13과 그림 14는 스텝부하변동에 대한 실험결과로서 설계된 전압조정기 제어회로가 위성의 급격한 부하변동 및 부품실패와 같은 최악조건하에서도 버스전압은 요구되는 50±0.5V전압요구조건범위 내에서 적은 리플을 갖고 안정적으로 동작함을 보여준다.

그림 13은 초기 15A의 부하에서 7.5A로의 스텝부하인가시 버스전압이 50±0.1V에서 50±0.3V 이내로 변화되는 것을 알 수 있다. 그림 14는 이와 반대로 7.5A의 부하에서 15A로의 스텝부하변동에 대한 버스전압특성을 보여준다. 그림 9 및 그림 10의 시뮬레이션 결과에서 보여준 것처럼 스텝 부하 변동시 12개 션트 스위치의 온, 오프 및 PWM동작을 통해 그림 13과 그림 14와 같은 안정된 버스전압을 유지하게 된다.

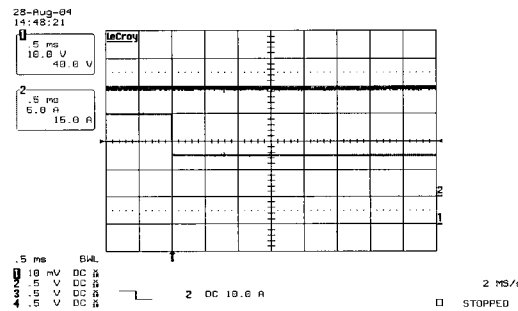


그림 13 스텝부하변화에 따른 버스 전압 변화(15A->7.5A)
 Fig. 13 Bus voltage ripple at transient status(15A->7.5A)

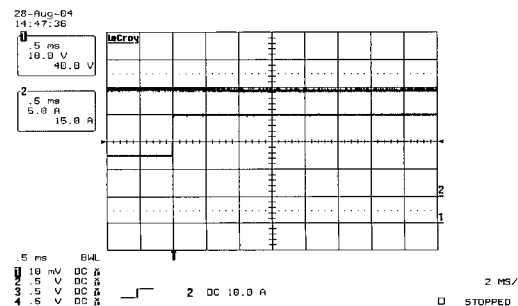


그림 14 스텝부하변화에 따른 버스 전압 변화(7.5A->15A)
 Fig. 14 Bus voltage ripple at transient status(7.5A->15A)

5. 결 론

본 논문에서는 정지궤도 통신위성을 위한 태양전지 어레이 스위칭 셉트 전압조절기의 설계, 해석 및 시험이 수행되었다. 임무말까지 최악조건을 고려하여 0.1%의 허용오차 값을 갖는 정밀 저항을 선택함으로써 최대 및 최소 오차 전압값이 0.0921V의 범위 내에서 제어가 가능함을 확인하였다. 셉트 전압조절기의 각 스위치 모듈에 포함된 FPGA 제어로직 및 스위칭 동작에 대한 시뮬레이션 수행을 통해 회로의 신뢰성을 확인하였으며, 위성전력용량 증가시 FPGA 로직변경만을 통해 확장이 가능함을 제시하였다. 또한 제안된 회로의 15A의 부하에서 7.5A로의 스텝부하 인가실험을 통해 최대 $50 \pm 0.3V$ 이내로 버스전압이 안정하게 동작함을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] KENG, W.U., "Loop Gain of a Spacecraft Shunt Power System," IEEE on Aerospace and Electronic Systems, Vol.30, No.4, 1994, pp.1049-1053.
- [2] FLECK. G.W., "Solar Array Switching Unit Analysis," *Proceeding of the 19rd Energy Conversion Engineering Conference*, 1984, pp.576-581.
- [3] Patil. A.R., and Cho B.H., "Design for a Solar ArrayUnit," *Proceeding of the 25rd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, pp.373-379.
- [4] Decker D.K., and Cassinelli. J., "High Power Array Switching Regulation," *Proceeding of the 16rd Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, 1981, pp.224-231.
- [5] 정영석, "전력변환회로의 디지털 전류모드제어기 설계", *전력전자학회 논문지*, 제10권 제2호, 4월, pp162-168, 2005.
- [6] 최재동, 성세진, "통신위성 전이궤도 전력운용 분석", *전력 전자학회 하계학술대회 논문집*, pp.189-192, 2003.
- [7] Gyubum Joung and Jaedong Choi, "Design of Solar Array Simulator for Spacecraft," *KIEE International Transactions on EMECS*, Vol. 12B, No. 2, 2002, pp.52-56.
- [8] J. D. Choi, "Conceptual Design of Electrical Power System for Communication Satellite", *Aerospace Engineering and Technology*, Vol.1, No.1, 2002, pp.84-96.

저 자 소 개



최재동(崔載東)

1967년 11월 25일생. 1993년 충남대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1995년~1996년 한국과학기술원 인공위성연구센터연구원. 1996년~현재 한국항공우주연구원 통신해양기상위성사업단 체계종합그룹 선임연구원.