

스위칭 방식을 갖는 인공위성 전압 분류 조절기 디자인 고려

최재동*, 마근수*, 남문경*
한국항공우주연구소*

Design Consideration of Spacecraft Switched Shunt Power System

Jae-dong Choi*, Keun-Su Ma*, Moon-Gyung Nam*
Korea Aerospace Reserch Institute *

Abstract - In this paper, solar array switching regulation is proposed as a replacement for conventional regulation techniques to reduce weight, thermal dissipation, and power system complexity for large power spacecraft. Each component model is developed which is used to explain the interaction of the solar array switching regulation and constant power type load, solar array.

1. 서론

대부분의 조절방식을 갖는 위성의 전력시스템들은 낮기간동안 태양전지 어레이의 출력전압을 조절하기 위해 분류 조절기를 사용한다. 이러한 태양전지 어레이 분류조절기 제어 형태는 복잡성과 다양성을 포함하고 있으며 어레이가 여러가지 형태로 전기적으로 분리되어질 수 있고 위성의 전력용량 증가시 혹은 부피 감소, 열 소진 최소화 등의 요구로 인해 종래의 전압 조절기 기술들을 대체하기 위해 스위칭 방식들이 제안 되어지고 있다. 이전의 분류조절기에서는 분류기에서 높은 열소진이 있으며 전력용량이 증가하면 할수록 더욱 심각하다. 따라서 보다 큰 전력용량에서 스위칭 형태의 조절기가 더욱 바람직 하다고 할 수있다.[3][4]

스위칭 형태의 분류조절기는 지나친 전력이 공급될 때 불필요한 모듈을 단락시킴으로서 버스전압을 조절한다. 이러한 태양전지 어레이 스위칭 조절 기술들은 태양 전지 배열기의 스위칭 개념을 고려할 때 4가지 기본형태로[1] 구분할 수 있으며 이중 직렬 스위칭 병렬 어레이, 단락 스위칭 병렬 어레이가 가장 많이 이용되고 있으며 이 형태의 장점은 존재하는 디자인에 부가적인 권선없이 스위치를 증가하여 사용가능하고 간단한 스위치 구동회로가 이용되어질 수 있다. 일단 스위칭 형태가 결정되면 스위치 제어방식이 결정되어야 한다.

본 연구에서는 단락 스위칭 병렬어레이방식을 채택하였으며 시스템 설계시 고려되어야 될 부분들을 제시하였다. 이 회로는 비소진 형태로 여타 방식에 비해 열발생이 적으므로 위성의 열적 문제를 줄일 수 있으며 부피가 작고 경량으로 만들 수 있다. 또한 제어방식은 이진 카운터와 슈프트 레지스터를 결합함으로써 제어라인에 최소수가 사용되고 직선적인 제어방식과 레환루프의 안정도가 쉽게 결정되어진다.

Section II는 제어동작원리, 전압비교기의 분석을 보여주고 있으며 Section III는 태양전지 어레이의 모델링, 부하 및 필터 모델링 Section IV는 소신호 등가 모델 및 블록다이어그램을 제시하였다.

2. 단락스위칭 병렬 어레이 분류조절기

2.1 스위칭 동작원리

그림 1.에서 위성의 태양전지 어레이는 규칙적으로 분할되어 있고 분류 스위치가 직렬로 연결되어져 있다. 낮기간 동안 각 어레이 모

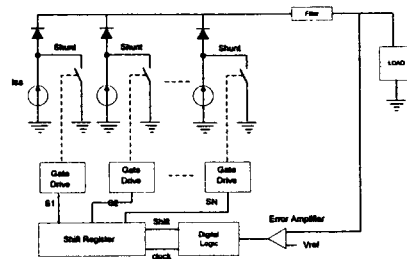


그림 1. 스위칭 분류조절기 블록 다이어그램

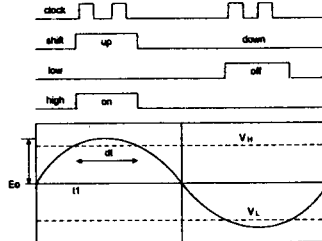


그림 2. 전압검출 동작원리도

들은 전류원으로 동작한다. 개별적인 분류 스위치의 온/오프동작은 슈프트 레지스터의 출력 논리상태와 일치하여 결정되어진다. I_{sa} 의 크기, 부하요구량, 스위치의 수 그리고 결합된 슈프트 레지스터 비트에 따라 온 상태와 오프상태가 일치 하여 변화한다. 전압 분류 조절기는 버스전압을(V_{bus})검출하고 기준전압 V_{ref} 와 비교하여 오차신호를 발생시킨다. 출력 버스 전압 조절은 오차 증폭기를 통한 버스전압을 검출함으로써 얻어진다. 오차 출력이 V_H 를 초과할때 온 영역은 디지털 논리를 동작시키고 그 결과 슈프트 레지스터에 더 많은 비트들이 스위치 온에 일치하는 상태에 있다. 만약 반대로 오차 출력이 V_L 아래로 떨어진다면 오프 영역은 더 많은 비트들을 턴-오프 하게 될 것이다 실제 동작에 있어서 부하감소 혹은 어레이 전원 공급 증가는 버스전압을 증가시키는 경향이 있다. 이러한 조건 아래서 더 많은 분류기들이 지나친 공급전류들을 흡수하기 위해 턴 온 될 것이다. 같은 이유로 부하 수요의 증가 혹은 전원 공급 감소는 더 많은 분류스위치를 오프시킨것이고 어레이 모듈 전류를 증가시키 이용하게 될 것이다.

2.2 오류 검출 오프회로

태양 전지판에서 나오는 전력은 스위칭 소자를 거쳐 주 전압 선로에 있는 커패시터를 충전시킨다. 커패시터의 전압이 즉 주 전압 선로의 전압이 조절하고자 하는 범위를 넘어서면 오류검출 오프가 그 넘어선 전압의 크기를 오류신호로 출력시킨다. 이 출력은 전압비교기의 입력으로 사용되어 V_{th} 전압과 비교되어 스위칭 소자를 온/오프 구동시키게 된다.

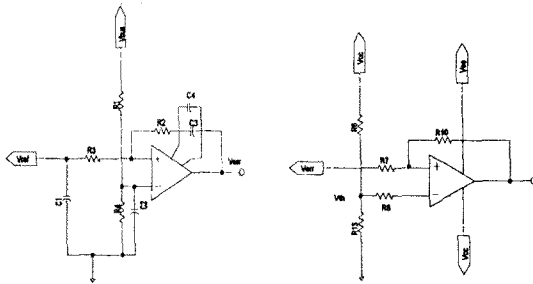


그림 3. 오류검출 오프회로 및 전압비교기 회로도

- a) 오류검출 오프회로
- b) 전압비교기

이 회로의 역할은 주전압 선로의 전압이 조절범위를 벗어 났을 때 오류전압을 발생시킨다. 설계예정된 전압은 $70V \pm 1\%$ 이다. 회로는 그림 3.과 같다. 회로의 전달함수를 구하면

$$\frac{V_{err}}{V_{bus}} = \frac{R_2 (Z_1 V_{bus} - V_{ref})}{R_3} \left(1 + \frac{1}{SC_3 R_2}\right) + Z_1 V_{bus} \quad (1)$$

$$\text{여기서, } Z_1 = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \times \left(\frac{1}{1 + SC_2 (R_4 // R_1)}\right) \quad (2)$$

V_{err} : 오류검출 오프의 출력

V_{bus} : 선로 전압 입력

설계변수들을 살펴보면 R_1 과 R_4 의 저항비에 의해 선로전압이 나누어 진후 그전압과 V_{ref} 가 비교되어진다. 여기서 R_1 과 R_4 는 선로전압이 70V일 때 V_{ref} 와 동일하게 되어 오류출력이 0이 되도록 결정되어진다. C_1 의 역할은 V_{ref} 를 안정화 시키기 위한 커패시터로 전달함수 계산에는 어떤 역할을 하지 않는다. C_2 는 오프 회로에 초기 전원이 들어갈 순간에 R_4 에 걸리는 전압을 0으로 잡아 최대 오류전압을 발생시키는 역할을 한다.

2.3 전압비교기(슈미트 트리거 회로)

이 회로는 조절 범위내에서 MOSFET스위치를 온/오프 구동시킨 이진 구동신호를 만들어 낸다. 오류 오프에서 나오는 오류전압과 안정된 전원을 저항 디바이드로 나누어 만든 V_{th} 전압과 비교하여 크면 하이 신호를 작으면 로우신호를 만들어 낸다. 비교 방식은 슈미트 트리거링을 사용한다. 그림 9는 전압비교중의 하나를 보여주고 있다. 양의 계환을 사용하므로 OP 오프의 (+)와 (-)입력단자의 전압이 약간만 틀려도 출력은 포화가 된다. 회로 해석을 해보면 우선 출력이 양의 포화 전압 $+V_0$ 상태에 있고 입력 V_{err} 이 V_{th} 보다 큰 상태에서 점점 줄어들어 $(V_0 - V_{err}) \frac{R_7}{R_{10}} + V_{err}$ 이 V_{th} 보다 증가되면 다시 출력은 $+V_0$ 로 돌아온다.

3. 모델링

3.1 태양전지 어레이의 모델링

태양전지 셀을 개별적으로 접속하여 태양전지 배열기를 모델하는

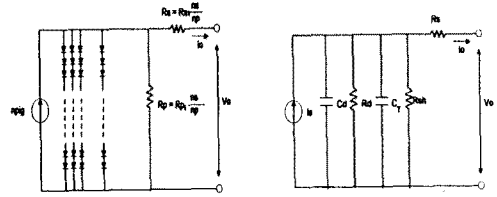


그림 4. 태양전지 매크로 모델 및 소신호 모델

- a) 태양전지 매크로 모델
- b) 태양전지 소신호 모델

n_s = 직렬셀의 수

n_p = 병렬 셀의 수

n_s, n_p = 단위셀에 대한 변수값

것은 가능하지만 이러한 접근은 대용량 어레이들을 취급할 때 비효율적이다. 컴퓨터 계산시간이 많이 소요되며 쉽게 계산용량을 초과할 것이다. 이것에 대한 태양전지 어레이의 매크로 모델링 접근이 그림 4.a에 묘사되어졌으며 이방식은 전체 어레이를 시뮬레이션 하기위해 등가 셀모델을 사용한다. 태양전지의 소신호 모델은 그림 4.b에 보여지고 있으며 어레이에 직렬 접속된 셀의 각 모듈에 대한 V-I관계는 방정식[3]에 주어졌다.

$$I_0 = I_g - I_s \exp(K_0 V_d) - \frac{V_d}{R_p} \quad (3)$$

여기서

$$K_0 = \frac{q}{\partial KT} \quad (4)$$

$$V_d = \left(\frac{V_0}{n_s} + I_0 R_s\right) \quad (5)$$

V_0 = 출력전압, I_g = 광기전류(A), I_s = 역포화전류, V_0 = 다이오드 전압, n_s = 직렬셀의 수(n) 이다.

3.2 부하 및 버스 필터 모델링

3.2.1 부하 모델링

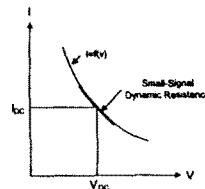


그림 5. 부하 소신호 특성곡선

버스부하의 입력 임피던스는 조절기의 루프특성에 중요한 영향을 가질수 있기 때문에 모든 위성 부하의 모델들이 개발되어졌고 시스템 안정도 해석에 고려되어지고 있다. 부하의 대부분은 전력 입력 단자들에 능동필터틀 포함하며 부하들은 dc-dc 컨버터들을 포함하거나 또 다른 스위칭 타입의 조절기를 포함한다.

이러한 부하들은 그림5.에서 보여지는 것처럼 소신호 부저항 동특성으로 특징지어진다. 전압 버스는 3가지 종류의 부하형태와 결합되어 있다.

- 1)dc/dc 컨버터를 포함하는 부저항 특성
- 2)입력 필터만을 갖는 부하
- 3)순저항 부하

3.2.2 버스필터 모델링

그림6.a의 모델은 스위칭 컨버터 부하에 대한 태양전지 어레이 스위칭 조절기의 동작을 설명하기 위한 그림이다. 버스 필터는 태양전지 어레이 스위칭 조절기 출력과 부하전류사이차이에서 발생하는 전류, i_f 를 흡수하기 위해 필요하다. 그림6.b는 태양전지 어레이 스위칭 조절기의 출력에 대한 I-V특성과 스위칭 레귤레이터 부하

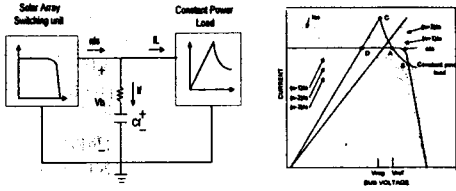


그림 6. 스위칭 조절기 동작 해석 모델 및 출력에 대한 I-V특성과 부하의 교차점

- a) 태양전지 어레이 스위칭 조절기 동작 해석 모델
- b) 스위칭 조절기의 출력에 대한 I-V특성과 부하의 교차점

의 교차점을 보여주고 있다. 동작점은 그림 6.b의 기준전압 V_{ref} 점A에 의해서 표시되어지는 것처럼 태양전지 특성의 일정 전류비로 유지되어지고 있다. 이 동작점은 부하의 부저항 특성에 기인하여 불안정하다. 이 시스템의 첫 번째 가정의 동작 특성을 이해하기 위해 초기 동작점A를 살펴보면 이점으로부터 약간의 감소는 전압의 증가를 가져오고 결과적으로 부하에 의해 요구되는 입력 전류의 감소를 가져온다. 태양전지 어레이 스위칭 조절기의 출력은 일정하게 남아있기 때문에 조절기와 부하사이에 오차 전류가 있고 이것은 버스필터에 의해 흡수되어질 것이다. 버스필터로 흐르는 이 전류는 버스전압 V_b 를 좀더 상승시키게 될 것이다.

4. 버스 임피던스 루프이득 고려

4.1 버스 임피던스

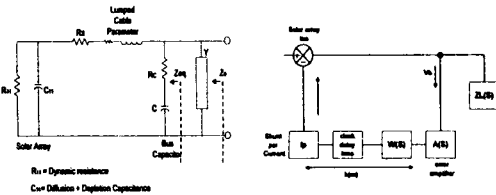


그림 7. 소신호 등가 모델 및 블록다이어그램

- a) 소신호 등가 모델
- b) 블록다이어그램

태양전지 어레이는 요구되어지는 전압을 얻기위해 많은 셀을 직렬로 접속하고 전체 어레이 전류를 얻기위해 병렬로 스트링을 접속한다. 각 모듈에 대한 값들을 얻기위해 임피던스 값들은 직렬셀의 수에 의해 오르게 되고, 병렬로 된 셀의 수에 의해 내리가게 된다. 그림7.은 그 시스템에 대한 소신호 등가모델을 보여준다.

스위칭 전압조절장치의 궤환 제어기 이득 어드미턴스는 Y 로 표현되어지고 있다. 등가 태양전지 어레이 와 버스 커패시터 출력 임피던스 Z_{eq} 는 레귤레이터 이득 Y 없이 시스템의 개방루프 버스 임피던스이다. 일반적으로 C_{II} 과 R_S 의 값은 작고 버스 개방 루프 임피던스 Z_{eq} 는 다음과 같이 근사화 될 수 있다.

$$Z_{eq} = \frac{R_{II}(1 + S/\omega_0)}{1 + S\omega_1} \quad (6)$$

여기서 $\omega_0 = \frac{1}{CR_C}$ (7)

$$\omega_1 = \frac{1}{CR_{II}} \quad (8)$$

그림 7.a는 Z_{eq} 에 대해 보여지고 있다.

4.2 루프 이득과 안정도

전압조절기는 시스템 궤환 이득으로서 레귤레이터 이득 Y 와 함께 간단한 궤환 시스템을 형성한다. 버스의 동적 변환은 시스템 루프 이득 형태에 의존하고 그것은 다음과 같이 정의 된다.

$$T = Y Z_{eq} \quad (9)$$

패루프 버스임피던스는

$$Z_0 = \frac{Z_{eq}}{1 + T} \quad (10)$$

$$\text{전압조절기 이득함수는 } Y = \frac{i_{sh}}{V_b} = k_m A(S) \quad (11)$$

여기서

i_{sh} = 소신호 스위치 전류

V_b = 소신호 버스 전압

$A(S)$ = 오차 증폭기 이득

$$k_m \text{은 디지털 제어기 이득이다. } k_m = \frac{I_P}{V_P} \quad (12)$$

여기서 I_P = 각 어레이 모듈 전류

V_P = V_{ref} 의 크기

루프 이득 T 를 적절하게 형성함으로써 시스템 안정도를 보장할 수 있고, Z_0 는 최적화 되어질 수 있다. 루프 이득 디자인에서 기본적인 고려는 T 가 타당성 있는 안정한 마진을 갖고 떨어져야 한다. 동시에 T 는 버스 레귤레이션 지평을 맞추기 위해 dc에서 높아야 한다. 루프 이득 T 를 얻기 위해 방정식(11)에서 오차 증폭기 이득 $A(S)$ 가 이용되어질 수 있다.

5. 결론

본연구에서는 스위칭 방식을 갖는 전압조절기 디자인 설계 및 해석에 있어서 선행되어야 할 부하의 동적특성 해석, 태양전지 매크로 모델링 및 해석을 Spice 시뮬레이션을 통해 구현하였고 이러한 특성곡선은 전체적인 위성의 전력제어장치해석에 있어 개별 소자들의 보다 실질적인 접근이 이루어 졌다. 앞으로 진행되어야 될 과제는 이러한 해석과 전체적인 시스템 구성을 통해 일치하는지를 연구해야 할 것이다.

[참고문헌]

- [1] D.K.Decker, J.Cassinelli, "High Power Solar Array Switching Regulation", IECEC, pp224-231, 1981
- [2] G.W.FLECK, "Solar Array Switching Unit Stability Analysis", IECEC, pp576-581,1984
- [3] A.R.Patil and B.H. Cho, "Design Consideration for a Solar Array Switching Unit", pp373-379, IECEC, 1990
- [4] KENG WU, "Loop Gain of a Spacecraft Switched Shunt Power System, IEEE, pp1049-1053, 1994

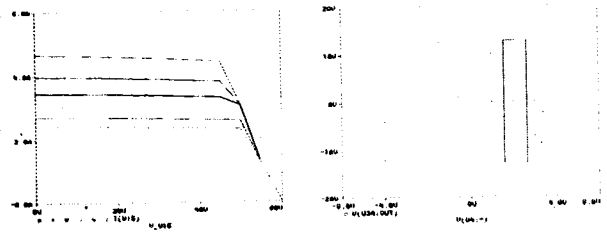


그림 8. 태양전지 어레이 모듈의 I-V특성곡선

그림 9. 슈미트 트리거 임. 출력

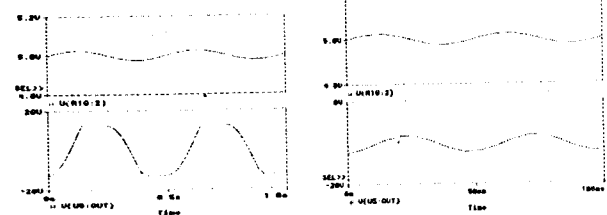


그림 10. 오픈전압 입력과 오픈루프 출력전압
a) $f = 2\text{Hz}$
b) $f = 20\text{Hz}$