

## 무궁화 위성체 전압조절장치 모델링

정규범\*, 김성규\*, 황보한\*\*  
 (\* 한국항공우주연구소 무궁화위성그룹, \*\*한국전기통신공사 위성사업단)

### The Modeling of Power Regulator for KOREASAT

G. B. Joung\*, S. K. Kim\*, H. Hwangbo\*\*

(\* Korea Aerospace Research Institute, Koresat Group,  
 \*\*Korea Telecom, Satellite Business Group)

#### ABSTRACT

A partial shunt regulator (PSR) which is the power regulator of KOREASAT is modeled. The modeling of the PSR consist of solar array, power circuit, controller, and load models. To realize simple structure, a voltage source of the PSR controller is used the output voltage of the PSR. The model of the PSR has very complex structure with two additional coupled feedback loops. The complex model is simplified to a simple meaningful model with only main feedback control loop. The proposed model is compared to a PSR model with DC voltage source at the PSR controller. The proposed PSR model is verified by comparing the model with SPICE simulation for small signal analysis.

#### 1. 서론

위성체의 전력계는 위성체의 궤도환경에 관계없이 임무기간 동안 위성체의 각 서브 시스템 및 탑재체에 필요한 전력을 공급하여 주는 서브시스템으로, 이를 위하여 전력계는 전력의 생성, 저장, 분배, 조절 및 제어의 기능을 갖는다[1-3].

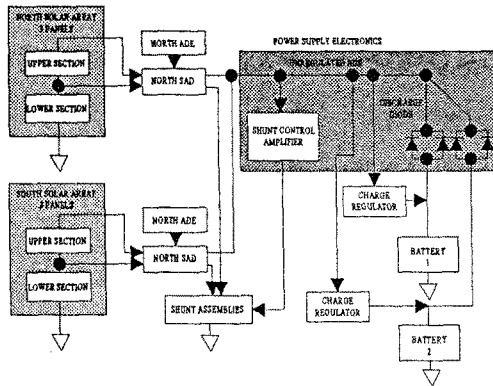


그림 1 무궁화 위성체 전력계 서브시스템

무궁화 위성의 전력계 시스템은 그림 1과같이 구성되어 있다 [4]. 그림 1에서 보이는 바와 같이, 전력은 태양전지의 직병렬 연결로 필요한 전압 및 전력을 얻는다. 생성된 전압은 위성의 궤도환경, 부하조건 및 제어 방식에 따라서 전압 및 전력 값이 변화하므로, 분류조절기(PSR)를 이용하여 궤도환경 및 부하조건에 관계없이 항상 일정하게 조절된다. 또한, 식현상(Eclipse) 때에는 배터리를 이용하여 전기 에너지를 공급한다.

본 논문에서는 분류조절기에 대하여 모델링하였다. 분류조절기 모델링은 태양전지, 전력회로, 제어회로 및 부하로 나누어 실행하였고 이를 통하여 분류조절기를 해석하였다. 그런데 제어 회로에서 전원은 제어될 출력전원인 버스전압을 사용하므로 별

도의 제어기 전원이 필요없이 효과적인 설계가 가능하지만 제어기의 특성이 매우 복잡한 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 제어기 전원을 포함한 복잡한 특성의 모델링을 제어기의 설계에 이용할 수 있도록 단순화된 형태의 모델링으로 개선하였다. 제안된 방식은 제어기 전원이 직류인 경우와 비교하여 검토되었다. 모델링에 대한 타당성은 모델링에 대한 주파수 특성분석 및 회로에 대한 SPICE 시뮬레이션을 통하여 증명하였다.

#### 2. 분류조절기

##### 1) 분류조절기 회로동작

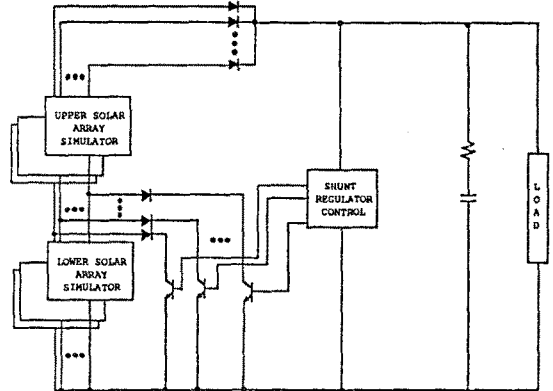


그림 2 부분 분류조절기의 회로 구성도

분류조절기에 대한 회로 구성도는 그림 2와 같다. 분류조절기는 아래 태양 전지판(Lower solar array)의 전류를 궤도환경 및 부하조건에 따라 조절해주므로서 아래 태양 전지판의 전압을 제어하여, 버스 전압을 항상 일정하게 제어한다[1, 4]. 태양 전지 회로는 그림 2에 보이는 바와 같이 두 개의 태양 전지판(Upper, lower solar array)을 한 개의 회로(Circuit)로 했을 때, 태양전지판 12 개의 회로가 분리(Isolation)용 다이오드를 거쳐 전력계 버스 전압과 연결된다. 분류조절기의 전력회로는 두 개의 태양 전지판 사이에 연결되어서 아랫쪽의 태양 전지판의 전류를 조절하는 기능을 한다. 이때, 제어회로는 출력 전압을 센스한 후 제어 알고리즘을 거쳐, 분류조절기의 전력회로 전류를 조절해준다.

##### 2) 모델링 해석

그림 2에 대한 안정도의 해석을 위한 분류조절기의 각 소자, 전력회로 및 제어회로는 그림 3과 같다. 그림 3에서 제어기의 전원은 태양전지 회로의 전원을 사용하므로서 별도의 제어전원이 없이 간단하게 구성되나 출력전압에 대하여 여러 증폭기 이외의 루프(Loop)로 커플링된다. 모델링을 수행하기 위한 소신호 블록 다이어그램은 그림 4와 같다. 그림 4의 모델링에서 전력계의 버스 전압의 제어는 버스의 전압을 센스하고 특정전압(Vref)

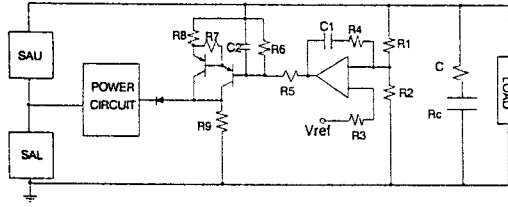


그림 3 부분 분류조절기 전력회로 및 제어회로

과 비교된 후 제어기인 에러(Error) 증폭기를 통하여 증폭되고 버스 전압과의 차이가 전류로 바뀌어 분류조절기의 전력회로의 전류를 조절한다. 이때, 버스 전압은 전류 증폭율에 직접 관련되어 에러 증폭기 및 전류 증폭기가 하나의 제어 알고리즘을 형성한다. 태양 전지판의 특성상 분류조절기의 전력회로 전류는 전압과 특정한 커브로 관련된다. 따라서, 버스 전압의 제어가 분류조절기 전력회로 전류의 조절로서 가능해진다.

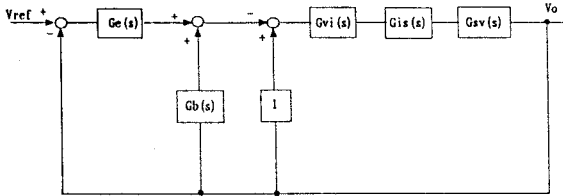


그림 4 소신호 블록 다이어그램

블록 다이어그램에서  $G_e(s)$ 는 제어기 에러 증폭기를 통한 트랜지스터 베이스 전압,  $G_b(s)$ 는 버스 전압에 대한 트랜지스터 베이스 전압,  $G_{vi}(s)$ 는 에미터 저항 양단 전압에 대한 전류 증폭율,  $G_{is}(s)$ 는 분류조절기 전력회로의 전류 증폭율에 대한 소신호 모델링을 나타내며,  $G_{sv}(s)$ 는 분류조절기 전력회로의 전류에 대한 버스 전압의 소신호 모델링값이다.

가) 제어기의 모델링

전류 증폭기를 포함한 제어기를 모델링하기 위하여 그림 3에서  $G_e(s)$ ,  $G_b(s)$  및  $G_{vi}(s)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$G_e(s) = -\frac{Z_4}{R_1} \cdot \frac{1}{1+s/pG} \cdot \frac{Z_6//Z_{QB}}{R_5+Z_6//Z_{QB}} \quad (1)$$

$$G_b(s) = \frac{R_5}{R_5+Z_6//Z_{QB}} \quad (2)$$

여기서,

$$Z_4(s) = \frac{1+sC_1R_4}{sC_1} \quad (3)$$

$$Z_6(s) = \frac{R_6}{1+sC_2R_6} \quad (4)$$

$$pG = \frac{G}{(R_1+R_2)R_4/(R_1R_2)} \quad (5)$$

이며,  $Z_{QB}$ 는 트랜지스터 베이스쪽 입력 임피던스,  $G$ 는 op-amp의 Gain Bandwidth Product를 나타낸다.

나) 트랜지스터 등가 에미터 양단전압에 대한 드라이브 전류 증폭기 모델링

트랜지스터 증폭율은 트랜지스터 특성과 에미터 양단전압과 저항과의 비(Ratio)에 의하여 다음과 같이 결정된다.

$$G_{vi}(s) = \frac{1}{R_e+R_8} \quad (6)$$

$R_e$ 는 트랜지스터 에미터쪽 등가임피던스를 나타낸다.

다) 전류 증폭기 모델링

전류 증폭기는 그림 3과 같이 전력용 트랜지스터로 구성되며,

제어기의 전류증폭기 출력전류가 분류조절기 전력회로의 전류로 증폭된다. 따라서 전류 증폭기 모델링 값  $G_i(s)$ 는 다음과 같다.

$$G_{is}(s) = \frac{K_i}{1+s/sP_2} \quad (7)$$

여기서  $K_i$  및  $sP_2$ 는 전류 증폭율 및 첫번째 Pole로서 전력용 트랜지스터의 특성값 및 회로정수 값으로부터 결정되며 출력전류에 따라 변동된다.

라) 필터 및 태양전지 모델링

분류조절기 전력회로 전류는 아래쪽 태양전지의 전류를 조절 하므로써 태양전지 전압이 제어된다. 따라서, 전력회로 전류에 대한 출력전압의 모델링은 그림 4와 같이 표시되므로 음의 값을 가지며 다음과 같다.

$$G_{vi}(s) = \frac{v_o(s)}{i_{sh}(s)} = -\frac{\{Z_c//Z_L\} \cdot Z_{SL}}{Z_{SU}+Z_{SL}+\{Z_c//Z_L\}} \quad (8)$$

여기서  $Z_F$  및  $Z_L$ 은 필터 및 부하의 임피던스,  $Z_{SL}$  및  $Z_{SU}$ 는 아래쪽 및 위쪽 태양전지의 등가 임피던스이며 다음과 같다.

$$Z_F = R_C + \frac{1}{sC} \quad (9)$$

$$Z_L = R_L \quad (10)$$

태양전지의 동작영역을 고려하면  $Z_{SL} \gg Z_{SU}$  이므로 식 (7)은 다음과 같이 단순화된다.

$$G_{vi}(s) = -\frac{\{Z_c//Z_L\} \cdot Z_{SL}}{Z_{SL}+\{Z_c//Z_L\}} \quad (11)$$

식 (8 - 11)에서

$$G_{vi}(s) = -\frac{\{R_L(1+sCR_C)\} \cdot Z_{SL}}{Z_{SL} \cdot \{1+sC(R_C+R_L)\} + \{R_L(1+sCR_C)\}}$$

$$= -\frac{R_L(1+sCR_C)}{1+sC(R_C+R_L)}$$

$$= -Z_L//Z_c \quad (12)$$

여기서 태양전지 특성, 부하조건 및 필터회로를 고려하면  $Z_{SL} \gg R_L//Z_F$  로서, 이는  $G_{vi}(s)$ 는 아래쪽 태양전지 임피던스는 일반적으로 부하와 필터의 병렬 임피던스보다 크며 따라서 태양전지 임피던스는 소신호 모델링에서 제외될 수 있음을 의미한다.

라) 간략화된 모델구현

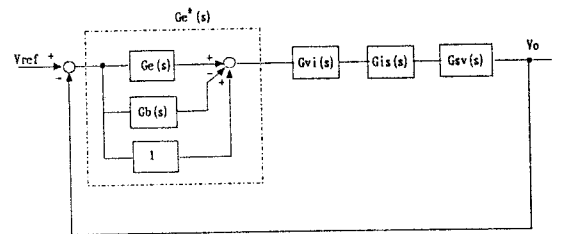


그림 5 모델링 개선을 위한 소신호 블록 다이어그램

그림 3과 식 (1) - (12)에서 분류조절기의 모델링은 구해졌으나, 앞서 기술한 바와 같이 모델링에 커플링 특성으로 인하여 이를 제어기 설계에 직접 적용하기가 곤란하다. 따라서, 이를 간략화시키면 모델링 블록 다이어그램은 그림 5와 같이 단순화 된다. 그림 5 및 식 (1) - (5)에서  $G_e^*(s)$ 를 구하여 정리하면

다음과 같다.

$$G_e^*(s) = K_A \cdot \frac{1}{sC_1R_1} \cdot \frac{1+sC_1(R_1+R_4)}{1+sC_2(R_5/R_6)} \cdot \frac{1}{1+s/pG} \quad (13)$$

식 (12 - 13)에서,

$$K_A = \frac{R_6}{R_5+R_6} \quad (14)$$

가 된다.

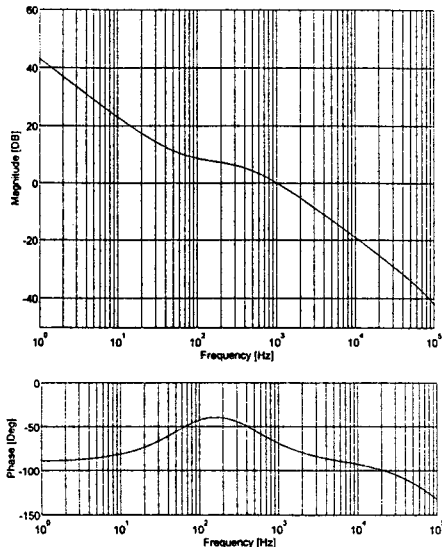


그림 6  $G_e^*(s)$ 의 Bode plot 해석결과

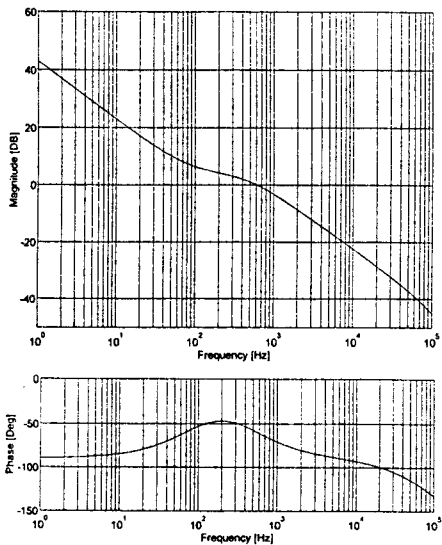


그림 7  $G_e^{**}(s)$ 의 Bode plot 해석결과

그림 2의 트랜지스터 Q1, Q2의 전원이 직류인 경우는 그림 4의 블록 다이어그램에서  $G_b(s)$ , +1의 Inner Loop가 없으므로 제어기의 등가 모델링은 다음과 같이 구해진다.

$$G_e^{**}(s) = K_A \cdot \frac{1}{sC_1R_1} \cdot \frac{1+sC_1R_4}{1+sC_2(R_5/R_6)} \cdot \frac{1}{1+s/pG} \quad (15)$$

따라서 식 (13), (15) 및 그림 5에서 제어기 전원이 출력전압인 경우 직류인 경우보다 Zero의 주파수가  $R_1/(R_1 + R_4)$ 배 이동한다.

그림 6 및 그림 7은 제어기 전원에 따른 제어기 모델링 값  $G_e^*(s)$ 과  $G_e^{**}(s)$ 의 주파수 특성을 비교한 것이다. 그림 6, 7에서 알 수 있듯이 Zero의 값은 식 (13)(15)에서와 같이  $R_1/(R_1 + R_4)$ 배 이동한다.

### 3. 시뮬레이션

분류조절기의 각 소자 특성을 포함한 전력회로 및 제어회로에 대한 SPICE를 통한 소신호 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 소신호 모델링의 해석과 시뮬레이션 결과의 특성을 비교하기 위하여 소신호 모델링 해석과 동일한 조건에서 수행하였다.

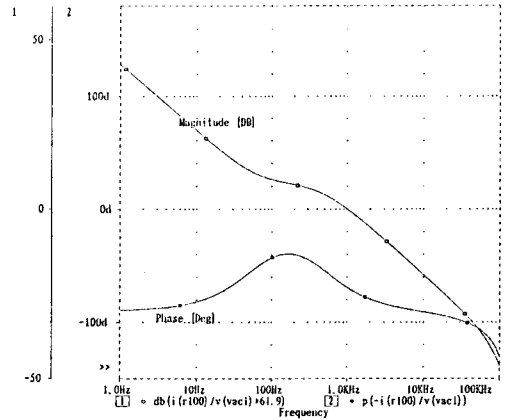


그림 8  $G_e^*(s)$ 의 Bode plot 시뮬레이션 결과

그림 8는  $G_e^*(s)$ 를 시뮬레이션 한 값이다. 그림 6, 8에서  $G_e^*(s)$ 의 모델링 해석 결과 및 시뮬레이션 결과는 대략 일치한다. 따라서, 소신호 모델링에 의한 해석 결과는 각 소자의 특성을 포함한 부분 분류조절기 시뮬레이션 결과와 유사하므로, 소신호 모델링 결과의 정당성이 입증되었다. 이는 소신호 모델링 결과를 이용하여 다양한 전력 조건의 위성체에 대하여 우주 환경조건에 무관하게 항상 안정되게 동작하는 부분 분류조절기의 전력회로 및 제어기를 설계할 수 있음을 의미한다.

### 4. 결론

본 논문에서는 무궁화 위성체의 전력계 서브시스템 중 전압조정장치인 분류조절기 회로를 모델링하였다. 분류조절기 모델링은 태양전지, 전력회로, 제어회로 및 부하로 나누어 실행하였고 이를 통하여 분류조절기를 해석하였다. 그런데 제어회로의 전원은 제어될 출력전원인 버스전압을 사용하므로 별도의 제어기 전원이 필요없이 효과적인 설계가 가능하지만 제어기의 특성이 매우 복잡한 단점이 있다. 본 논문에서는 제어기 전원을 포함한 복잡한 특성의 모델링을 제어기의 설계에 이용할 수 있도록 단순화된 형태의 모델링으로 개선하였다. 제안된 방식은 제어기 전원이 직류인 경우와 비교하여 검토되었다. 모델링에 대한 타당성은 모델링에 대한 주파수 특성분석 및 회로에 대한 SPICE 시뮬레이션을 통하여 증명하였다.

### [참고문헌]

- [1] 김성규외, 위성 BUS 시스템 기술지원 및 개발연구, 한국항공우주연구원, 1993.
- [2] R. D. Middlebrook and S. G. Kimble, "Design of the HERO Main Bus Shunt Regulator," IEEE Trans. on Aerospace and Electronics Systems, Vol. AES -12, No. 2, pp. 162-171, March 1976.
- [3] H. S. Rauschenbach, Solar Cell Array Design Handbook, Van Nostrand Reinhold Company, 1980.
- [4] 무궁화 위성 전력계 CDR 자료, Martin Marietta사, 미국, 1993.