

평균전류모드 제어방법을 적용한 병렬형 태양전력조절기 설계 및 제작

(Design and Verification of the Modularized Solar Array Regulator
using Average-current Mode Control)

박성우* · 박희성 · 장진백 · 장성수 · 이종인

(Sung-Woo Park · Hee-Sung Park · Jin-Beak Jang · Sung-Soo Jang · Jong-In Lee)

한국 항공우주 연구원

Abstract

Recently, as the power capability of satellites increase, we need to develop a new SAR(Solar Array Regulator) with much higher power capacity whenever we design a power system of a new satellite. In this case, modular design method could be a good solution for this kind of problem. But when we use a modular method in the design of the paralleled converter, it is very important to share current equally between each module connected in parallel. In this paper, we study how to design the optimum current control-loop and voltage control-loop when we apply average current-mode control method to the parallel module SAR. With the design results, we make a prototype of the 3-module paralleling SAR and verify its performances.

1. 서 론

최근에는 위성탑재체인 통신장비나 과학 측정 장비등이 점점 대형화되고 많은 기능을 요하는 추세에 있어 태양전력 조절기를 비롯한 위성의 전원공급 장치들도 점점 대형화 되고 있다. 따라서 전원장치의 대형화는 대 전력의 새로운 전원장치를 계속 개발해야 함을 의미한다. 예를 들면 새로운 위성의 개발과정에서 태양전력 조절기를 설계하는 과정에서 그 기능이 이전에 다른 위성에서 채택된 것과 동일하다고 하여도 출력 인덕터, 커패시터를 포함한 필터의 설계를 비롯하여 소자의 특성검토, 노이즈 문제 뿐 아니라 열(thermal) 문제로 인하여 새로운 컨버터의 계속적인 연구개발이 요구되고 있다. 그러나 대용량 위성의 전원 시스템을 기존에 개발되어 위성에 적용된 소형 전원장치의 병렬연결로 모듈화 할 수 있다면 계속적인 위성의 전력 대형화에도 신뢰성을 갖는 전원장치를 짧은 개발 기간에 적은 개발 비용으로 구현 할 수 있다는 장점이 있다. 즉 전력이 커지면 모듈 수를 증가하여 대 전력화의 요구를 수용할 수 있는 것이다. 미국이나 유럽을 비롯한 위성 개발 선진국에서는 이러한 연구를 착수하여 위성의 전원장치에 일부 모듈화 된 장치를 개발하여 사용하고 있으며 위성개발 기간 단축 및 개발비용 감소 등의 이점으로 그 추세는 점점 더 가속화 될 전망이다. 따라서 우리나라에서도 이러한 위성 전원장치의 모듈화가 매우

필요하며, 그 중 가장 큰 전력을 변환하는 태양전력 조절기를 모듈화하고 설계, 개발하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다.

본 논문에서는 병렬운전이 가능한 태양전력 조절기 모듈을 설계하기 위해서 평균전류 제어방법을 적용하여 3-모듈 1.5KW 급의 시제품에 대하여 최적의 전류, 전압 제어 루프를 설계하였다. 시뮬레이션과 실험을 통해 정상동작 상태에서 병렬형 태양전력 조절기의 전류분배 특성을 검증하고, 모듈 오동작 특성을 확인함으로써 향후 증가하는 위성 전력시스템의 대용량 전력 조절기에 적용 가능성을 확인하였다.

2. 단일 모듈 설계

위성에 사용되는 태양전력 조절기는 일반적으로 강압형 컨버터인 Buck 형태의 전원단을 사용한다. 본 논문에서는 표 1과 같은 입출력 전압, 전류 특성 및 전기적 사양을 갖는 태양전력 조절기 전원단에 대하여 평균전류 제어방법을 적용하기 위해 적절한 전류 및 전압 제어루프를 설계한다.

본 논문에서는 개별소자를 사용하여 PWM IC의 기능을 구현하였다. PWM 제어 IC구현을 위한 블록은 크게 발진부, 클럭 생성부, 램프 신호 생성부 및 전류, 전압 보상을 위한 보상기, 램프와 에러신호를 비교하여

PWM 제어 신호를 만들어 내는 비교기로 구성된다. 그림 1은 제어를 위한 PWM 기능을 담당하는 블록을 나타낸다. 제시된 제어 IC 블록에서 클리어, 리셋, 클럭 및 듀티와의 관계를 나타내는 동작 파형을 그림 2에 나타내었다.

표 1. 태양전력조절기의 전기적 사양
Table 1. Specification of the solar array regulator

항 목	전기적 사양
입력 전압[V]	0 ~ 90V
입력 전류[A]	0 ~ 90A/module
출력 전압[V]	22 ~ 34V
출력 전류[A]	0 ~ 23A/module
스위칭 주파수[kHz]	100kHz
전력 용량[W]	500W/module
출력필터 인덕터[uH]	95uH
출력필터 커패시터[uF]	44uF, ESR=0.24ohm

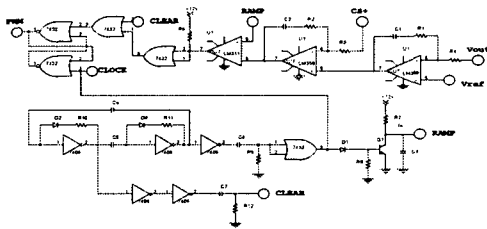


그림 1. PWM 신호 생성 회로블럭
Fig. 1. Circuit block diagram of the PWM signal generation

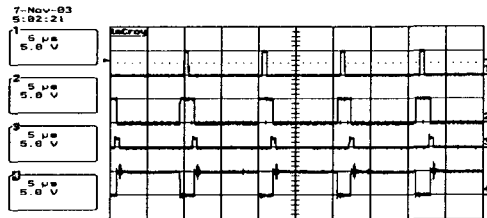


그림 2. 클리어, 리셋, 클럭 및 듀티 신호(@D=0.85)
Fig. 2. Clear, Reset, Clock and Duty signal at PWM Duty Value=0.85

평균전류 제어방법에서 제어블럭의 설계는 전류 제어 루프 설계와 전압 제어루프 설계의 순으로 이루어진다. 전류 제어루프를 설계하는 최종 목적은 동특성 향상을 위해서 전류 제어루프가 가능한 높은 주파수 대역을 갖게 하고, 스위치 오프 시간동안 비교기의 입력에서 외부 램프신호의 기울기보다 크지 않은 에러 신호를 생성 하면서 단일 이득 주파수(f_{ci})에서 전체 전류루프 이득이 -1의 기울기를 갖게 하는 것이다. 단일 이득 주파수

에서 전체 전류루프 이득이 -1의 기울기를 갖기 위해서 전류 보상기는 $f_{ci}/2$ 에 영점을 하나 포함해야 된다. 즉, 전류 보상기의 이득과 영점, 극점은 다음의 두 가지 조건에서 얻어진다.[1],[2]

- 비교기에서 발산하는 것을 방지하기 위해 등가전압 성분으로 변환된, 오프 기간동안 인덕터 전류의 하강 기울기는 램프의 상승 기울기보다 작아야한다.
- PWM/POWER 블록의 이득과 전류 제어기 이득의 곱이 1이 되는 주파수를 전류 루프의 단일 이득 주파수로 설정한다.

그림 3은 설계된 평균 전류모드 제어기를 포함한 전원단을 나타내며, 그림 4는 전원단, 전류 보상기 및 전체 전류루프 이득의 Bode 선도를 나타낸다. 설계된 보상기 변수들의 값은 다음과 같다

- 전류 보상기 이득 : $GCA = 5.2$
- $R_{ii} = 10Kohm$, $R_{fi} = 52Kohm$, $C_{fi} = 195pF$
- 단위 이득 주파수(C_{fi}) : $31.36KHz$

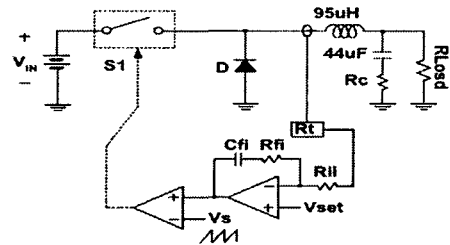


그림 3. 평균 전류모드에서의 전류 루프
Fig. 3. Current-loop of the average-current mode control

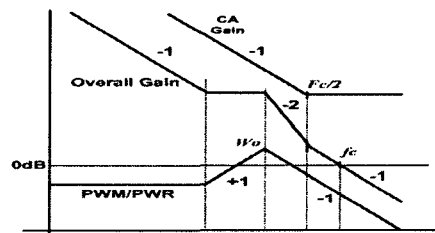


그림 4. 전류 루프의 Bode 선도
Fig. 4. Bode plot of the current-loop

전압 제어루프의 설계 목적 및 방법도 전류 제어루프와 동일하다. 즉, 가능한 넓은 전압제어 루프의 대역폭을 가지면서 비교기 입력에서 램프의 기울기보다 작은 기울기를 갖는 에러 신호를 만드는 것이다. 전압 보상기의 이득과 영점, 극점은 다음의 조건에서 얻어진다.

- 전압 보상기는 전류 루프의 단일이득 주파수에 영점을 갖는다.

- 전압 에러신호에서 출력 전압까지의 블록은 필터 공진 주파수에서 한 개의 극점을 갖고, 출력필터 커패시터 ESR에 영점을 갖는다.

그림 5는 전압, 전류 보상기를 포함한 평균 전류모드 제어방식의 전원단을 나타내며, 그림 6은 전압루프 특성을 나타내는 전압보상기를 포함한 전압루프의 Bode 선도를 나타낸다. 설계된 보상기의 변수들의 값은 다음과 같다.

- 전류 보상기 이득 : $GCA = 0.42$
- $R_{ii} = 10\text{kohm}$, $R_{fi} = 4.2\text{kohm}$, $C_{fi} = 1.21\text{nF}$
- 단위 이득 주파수(C_{fi}) : 15.8KHz

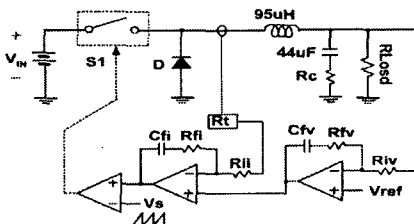


그림 5. 평균 전류모드에서의 전압 루프
Fig. 5. Voltage-loop of the average current mode control

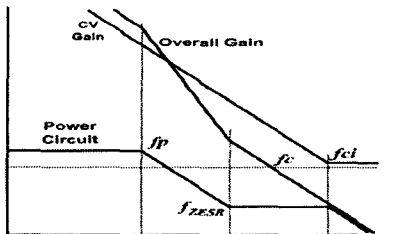


그림 6. 전압 루프의 Bode 선도
Fig. 6. Bode plot of the voltage-loop

그림 7과 그림 8은 설계된 제어기를 적용하여 제작된 단일 모듈이 각각 90V와 40V의 입력전압 조건에서 동작할 때의 PWM 신호, 외부 비교 램프신호 및 전압 보상기의 출력 에러 신호를 나타낸다.

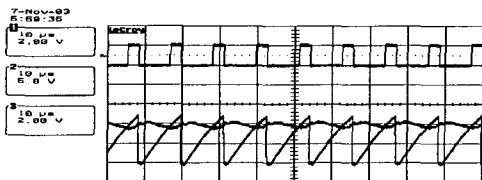


그림 7. PWM 신호, 외부 램프 신호, 에러 신호 (@ $V_{IN}=90V$)
Fig. 7. PWM signal, external ramp signal, error signal (@ $V_{IN}=90V$)

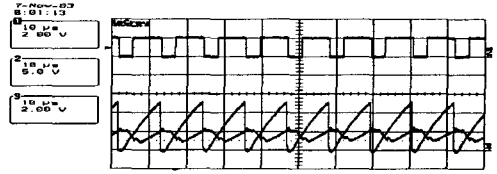


그림 8. PWM 신호, 외부 램프 신호, 에러 신호 (@ $V_{IN}=40V$)
Fig. 8. PWM signal, external ramp signal, error signal (@ $V_{IN}=40V$)

3. 병렬모듈의 특성 해석

그림 9는 앞에서 설계, 제작된 단일 모듈의 병렬연결로 구성된 3-모듈 병렬형 태양 전력조절기를 나타낸다. 2장에서 설계된 단일 모듈은 병렬연결 동작에서 각 모듈의 스위칭 제어를 위한 PWM 신호를 생성하는 곳에 해당 모듈의 전류 성분을 이용하기 때문에 단일 모듈의 단순 병렬연결로 모듈 간 전류 분배가 가능한 병렬형 태양전력 조절기를 설계, 제작 할 수 있다.

병렬 모듈형 태양전력 조절기는 병렬 동작하는 모듈 간 전류분배 특성과 특정 모듈 오동작 특성을 나타내는 모듈 Failure 응답 특성이 매우 중요하다. 따라서 본 논문에서는 입력 전압 변화와 부하변동 조건에서 각 모듈의 모듈 간 전류분배 특성을 알아보고 임의의 모듈 Failure를 가정하여 나머지 정상 동작하는 모듈에서의 전류 분배 특성을 시뮬레이션과 실험을 통해서 확인하였다.

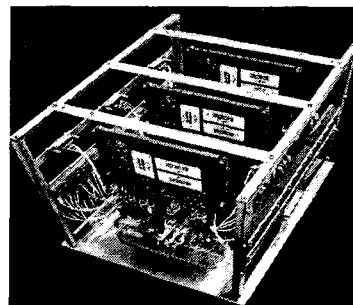


그림 9. 3-모듈 병렬형 태양전력 조절기 시제품
Fig. 9. Prototype of the 3-module parallel SAR

먼저 제작된 3-모듈 병렬형 태양전력 조절기를 이용하여 입력변화에 대한 각 모듈의 전류분배 특성을 확인한다. 태양전력 조절기는 매우 넓은 입력전압 범위에서 동작하므로 병렬형 태양전력 조절기의 입력변화에 대한 전류분배 특성은 매우 중요하다. 그림 10에서 그림 12는 28V의 출력전압과 30A의 부하전류 조건에서 입력

전압을 각각 40V, 60V, 90V로 변화 시키면서 각 모듈의 출력필터 인덕터에 흐르는 전류를 측정된 결과이다. 각 실험결과에서 보듯이 동일한 출력 부하조건에서 3개의 병렬모듈은 우수한 모듈 간 전류분배 특성을 나타내는 것을 확인하였다.

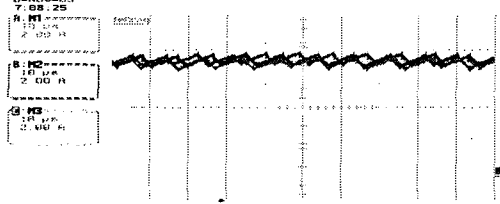


그림 10. $V_o = 40V$ 에서 각 모듈의 인덕터 전류 (@ $V_o=28V, I_o=30A$)
Fig. 10. Inductor current of each module at $V_o=40V$ (@ $V_o=28V, I_o=30A$)

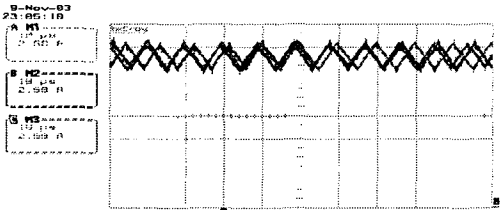


그림 11. $V_o = 60V$ 에서 각 모듈의 인덕터 전류 (@ $V_o=28V, I_o=30A$)
Fig. 11. Inductor current of each module at $V_o=60V$ (@ $V_o=28V, I_o=30A$)

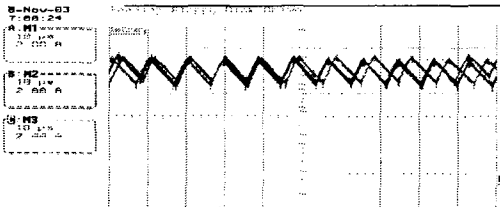


그림 12. $V_o = 90V$ 에서 각 모듈의 인덕터 전류 (@ $V_o=28V, I_o=30A$)
Fig. 12. Inductor current of each module at $V_o=90V$ (@ $V_o=28V, I_o=30A$)

다음으로 3-모듈 병렬형 태양전력 조절기의 부하변동에 따른 각 모듈의 전류분배 특성을 확인하였다. 60V의 입력전압과 28V의 출력전압 조건에서 전체 부하를 30A, 40A, 50A로 변화 시키면서 3-모듈의 전류 분배 특성을 알아본다. 그림 13에서 그림 15는 위의 부하전류 조건에서 각 모듈의 출력필터 인덕터에 흐르는 전류를 나타낸다. 실험 결과에서 부하변동에 상관없이 각 모듈은 우수한 전류 분배특성을 갖는 것을 확인 할 수 있다.

기존의 소용량 태양전력 조절기의 병렬로 대용량 병렬형 태양전력 조절기를 구현하는 것은 이미 우주 환경

에서 검증된 것을 사용함으로써 얻는 신뢰성의 증가 이외에 특정 모듈에 Failure가 발생하였을 경우 다른 모듈에 의해 정상 임무를 수행함으로써 전체 전원 시스템의 신뢰성을 더욱 향상시킬 수 있다.

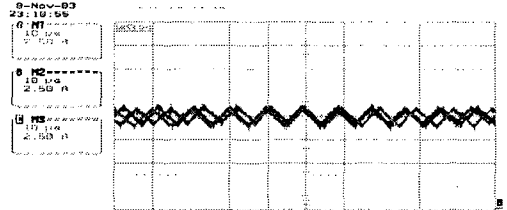


그림 13. $I_o = 30A$ 에서 각 모듈의 인덕터 전류 (@ $V_{IN}=60V, V_o=28V$)
Fig. 13. Inductor current of each module at $I_o=30A$ (@ $V_{IN}=60V, V_o=28V$)

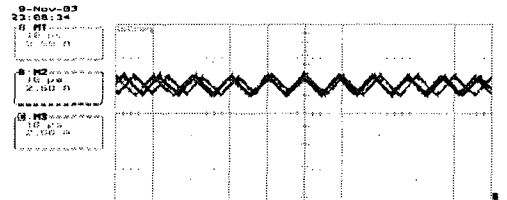


그림 14. $I_o = 40A$ 에서 각 모듈의 인덕터 전류 (@ $V_{IN}=60V, V_o=28V$)
Fig. 14. Inductor current of each module at $I_o=40A$ (@ $V_{IN}=60V, V_o=28V$)

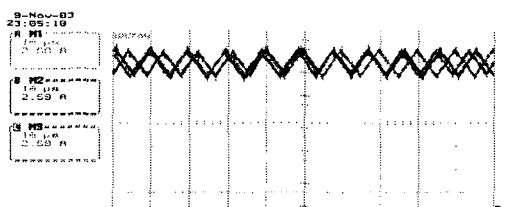


그림 15. $I_o = 50A$ 에서 각 모듈의 인덕터 전류 (@ $V_{IN}=60V, V_o=28V$)
Fig. 15. Inductor current of each module at $I_o=50A$ (@ $V_{IN}=60V, V_o=28V$)

따라서 설계, 제작된 병렬형 태양전력 조절기의 모듈 Failure발생시 동작모듈에서의 전류분배 특성을 확인하는 것은 매우 중요하다. 본 논문에서는 입력전압 60V, 출력전압 28V, 출력전류 30A의 정상 동작상태에서 모듈3에 Failure가 발생하는 경우를 가정하였다. 전체 병렬 모듈의 부하가 30A일 경우 모듈3에 Failure가 발생하면, 모듈 1과 모듈 2가 각각 15A의 전류를 분담해야 한다. 그림 14는 모듈3에 Failure를 가정한 경우의 시뮬레이션 결과이다. 모듈3의 인덕터 전류가 0으로 감소하며, 모듈 1과 모듈2의 전류가 각각 15A로 증가하며 정

상동작 상태에 도달한 후에도 각 모듈이 우수한 전류분배 특성을 나타내는 것을 확인 할 수 있다. 그림 15는 모듈3에 Failure가 발생하도록 하드웨어를 구성하여 모듈 Failure 응답을 확인한 실험 결과이다.

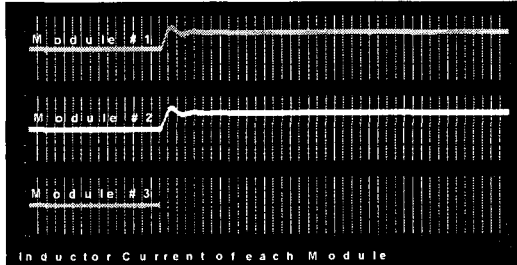


그림 14. 단일모듈 오동작 응답특성의 시뮬레이션 결과 (각 모듈의 부하전류는 10A임)
 Fig. 14. Simulation Results of Single Module Failure Response: Module-3 failed at each Module Carrying 10A

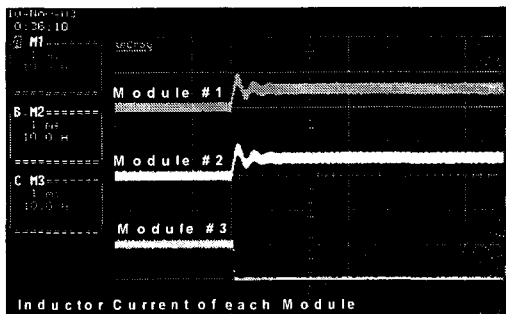


그림 15. 단일모듈 오동작 응답특성의 실험 결과 (각 모듈의 부하 전류는 10A임)
 Fig. 15. Experimental Results of Single Module Failure Response: Module-3 failed at each Module Carrying 10A

4. 결 론

본 논문에서는 태양전력 조절기의 모듈화 제어 방법으로 평균 전류모드 채택하여 3-모듈 병렬형 태양전력 조절기에 적용하여 전류, 전압 제어루프를 설계하였다. 설계 결과를 바탕으로 1.5kw 급의 시제품을 제작하여 다양한 입력 전압변화와 부하변화에 대해서 모듈 간 전류분배 특성을 검토하였다. 그리고 특정 모듈 Failure 발생시 전체 시스템의 전류분배 특성을 나타내는 모듈 Failure 특성을 시뮬레이션과 실험을 통해서 확인하였다. 위성의 전력조절기 개발과정에 본 논문에서 검증된 병렬형 태양전력 조절기 개념을 적용하여 소용량 태양전력 조절기를 설계할 경우, 향후 대 전력을 요하는 위

성의 설계과정에서 신뢰성 있는 대용량 태양전력 조절기를 짧은 기간 내에 저렴한 개발비용으로 설계, 제작 가능할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- (1) Dixon, "Average Current Mode Control of Switching Power Supplies," Unitrode Application Note.
- (2) Lloyd Dixon, " Switching Power Supply Control Loop Design," Unitrode Application Note.