

# 임계모드 부스트형 태양전력 조절기

양정환\*, 유상범, 윤석택

## Critical Conduction Mode BOOST Type Solar Array Regulator

JeongHwan Yang\*, SangBurm Ryu, SeokTeak Yun

### 요 약

DC-DC 컨버터는 인덕터 전류의 동작에 따라 연속전류모드와 불연속전류모드, 임계모드로 나눌 수 있다. 임계모드는 연속전류모드와 불연속전류모드의 경계에서 동작한다. DC-DC 컨버터를 임계모드에서 동작하도록 설계하면 인덕터 크기를 줄일 수 있으며 ZCS(Zero Current Switching) 동작을 하여 스위치와 다이오드의 전력 손실을 줄일 수 있다. 본 논문에서는 임계모드로 동작하는 부스트형 컨버터를 인공위성 용 태양전력 조절기에 적용한다. 임계모드 동작 시 DC-DC 컨버터의 입출력 조건에 따라 DC-DC 컨버터의 스위칭 주파수가 변한다. 최대 스위칭 주파수 제한을 위해 스위칭 주파수 제한 로직을 적용하였다. 한편, 임계모드 부스트형 태양전력 조절기는 소신호 전달함수가 간단하여 제어기 설계가 용이하다. 임계모드 부스트형 태양전력 조절기의 소신호 전달함수를 유도하고 이를 바탕으로 전압제어기를 설계하였다. 최종적으로 모의실험을 통해 임계모드로 동작하는 태양전력 조절기를 검증하였다.

**Key Words** : DC-DC power converters, solar array regulator, CRM, Boost converter, EPS, Satellite Power

### ABSTRACT

A DC-DC Converter operates in CCM(Continuous Conduction Mode), DCM(Discontinuous Conduction Mode), CRM(Critical Conduction Mode). The CRM is boundary between CCM and DCM. If a DC-DC converter is designed to operate in CRM, its inductor volume can decrease and power loss which caused by switch and diode can decrease. In this paper, the DC-DC converter which operates in CRM is applied to a solar array regulator(SAR) for the satellite. The switching frequency of the CRM boost SAR changes according to input and output condition. The switching frequency limit logic is applied to limit the maximum switching frequency. Meanwhile, the small signal transfer function of the CRM boost SAR is simple, so the controller design is also simple. In this paper, the small signal transfer function from control reference to solar array voltage is induced. And the voltage controller is designed based on the small signal transfer function. Finally, the CRM boost SAR is verified by simulation.

## I. 서론

DC-DC 컨버터의 동작은 DC-DC 컨버터 내의 인덕터 전류의 형태에 따라 연속전류모드(CCM, Continuous Conduction Mode), 불연속전류모드(DCM, Discontinuous Conduction Mode), 임계모드(CRM, Critical Conduction Mode)으로 분류된다. 연속전류모드는 인덕터 전류가 0[A]가 되지 않는 모드이며, 불연속전류모드는 인덕터 전류가 0[A]가 되는 모드이다. 임계모드는 연속전류모드와 불연속전류모드의 경계에서 동작한다. 즉, 인덕터 전류가 0[A]가 되는 순간, DC-DC 컨버터 내의 전력 스위치를 켜 인덕터 전류를 증가시킨다.

부스트형 DC-DC 컨버터가 연속전류모드로 동작할 때, 출력단 다이오드에는 Reverse-Recovery에 의한 전력 손실이 발생한다. 부스트형 DC-DC 컨버터의 스위치가 켜지면 출력단 다이오드에 저장되었던 전하가 순간적으로 방전되고 큰 스파이크가 발생하여 스위치와 다이오드에 전력 손실을 발생시키며 EMI성능을 저감시킨다. 불연속전류모드와 임계모드에서는 출력단 다이오드에 흐르는 전류가 0[A]가 된 후 스위치를 켜는 ZCS(Zero Current Switching) 동작을 하여 출력단 다이오드에는 Reverse-Recovery에 의한 전력 손실이 발생하지 않는다. 또한 같은 크기의 전류가 흐를 때, 불연속전류모드보다 임계모드의 인덕터 전류 RMS(Root Mean Square)값이 작으므로 DC-DC 컨버터의 저항 성분으로 인

\*한국항공우주연구원 (yangjh@kari.re.kr), 교신저자 : 양정환  
 접수일자 : 2014년 8월 27일, 수정완료일자: 2014년 9월 23일, 최종 게재확정일자 : 2014년 9월 23일

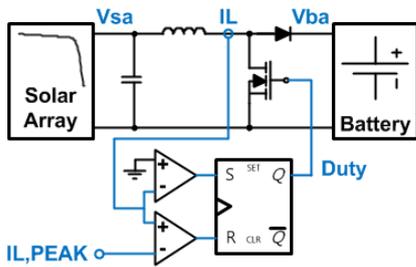
한 전력 손실은 불연속전류보다 임계모드에서 적게 나타난다[1].

연속전류모드로 동작하기 위해 인덕터는 큰 인덕턴스 값을 가져야 하므로 인덕터의 부피가 커야하지만, 임계모드로 동작하는 인덕터는 인덕턴스 값이 작아 인덕터의 부피를 줄일 수 있다. 이러한 이유로 임계모드로 동작하는 DC-DC 컨버터는 저전력 분야에 널리 이용되었다[2].

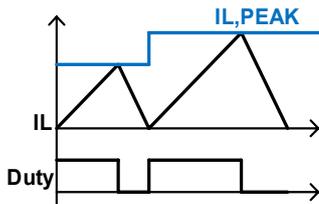
임계모드로 동작하는 DC-DC 컨버터를 저전력 소형 인공위성에 적용할 경우 효율과 부피 면에서 유리하다. 본 논문에서는 임계모드 부스트형 DC-DC 컨버터를 소형 인공위성용 태양전력 조절기에 적용할 경우 고려해야 할 제어회로에 대해 분석한다.

## II. 임계모드 태양전력 조절기

임계모드 부스트형 태양전력 조절기를 그림 1에 나타내었다. 적력단은 부스트형 DC-DC 컨버터를 사용하였고, 입력단에는 태양전지가 연결되고 출력단에는 배터리가 연결된다. RS 래치가 전력 스위치를 제어한다. 인덕터 전류가 0[A]가 되면 태양전력 조절기의 스위치가 켜지고 인덕터 전류가 증가하는데, 인덕터 전류가 설정된  $I_{L,PEAK}$  값을 넘으면 스위치가 꺼진다. 스위치가 꺼지면 인덕터 전류가 감소하는데 인덕터 전류가 0[A]가 되는 순간 다시 태양전력 조절기의 스위치가 켜진다. 부스트형 태양전력 조절기는 이 과정을 반복하여 임계모드로 동작한다. 임계모드의 인덕터 전류의 특성상 인덕터 전류의 평균값은 항상 인덕터 전류의 최대값의 절반이 된다. 따라서 설정된  $I_{L,PEAK}$ 을 제어하면 인덕터 전류의 평균 전류를 직접 제어할 수 있다.



(a) 임계모드 부스트형 태양전력 조절기



(b) 임계모드 인덕터 전류와 듀티 파형

그림 1. 임계모드 부스트형 태양전력 조절기의 인덕터 파형

### 1. 동작 주파수

임계모드 부스트형 태양전력 조절기는 입출력 조건에 따라 스위칭 주파수가 변한다. 입출력 조건과 주파수 관계는 아래 수식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{V_{SA}}{L} T_{ON} = I_{L,PEAK}, \frac{V_{SA} - V_{BA}}{L} T_{OFF} + I_{L,PEAK} = 0$$

$V_{SA}, V_{BA}$ 는 각각 태양전력 조절기의 입력인 태양전지 전압과 출력인 배터리 전압을 나타내고,  $T_{ON}, T_{OFF}$ 는 태양전력 조절기의 스위치가 켜지고 꺼지는 동안의 시간을 나타낸다.  $L$ 은 태양전력 조절기의 인덕터의 값을 나타내고  $I_{L,PEAK}$ 는 임계모드 제어를 위해 설정된 인덕터의 최대 전류값을 나타낸다. 위 식으로부터 스위치가 켜지고 꺼지는 주기를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$F_{sw} = \frac{1}{I_{L,PEAK} L} \frac{V_{SA}(V_{BA} - V_{SA})}{V_{BA}}$$

위 식으로부터 스위치 주기는 태양전지 전압과 배터리 전압, 인덕턴스, 제어하는 인덕터 전류의 최대값으로부터 결정될 수 있다. 임계모드 부스트형 태양전력 조절기가 주로 동작하는 태양전지 동작점과 배터리 전압을 기준으로 스위칭 주파수를 결정할 수 있다.

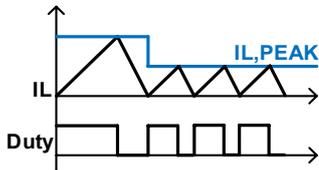
배터리 충전을 위해 태양전력 조절기는 최대전력추적모드로 동작하면서 태양전지로부터 최대 전력을 추출하여 배터리를 충전시킨다. 이때 태양전지는 최대 전력점 부근에서 동작한다. 배터리 최대 방전 전압과 태양전지의 최대 전력점 전압과 전류 값으로부터 임계모드 부스트형 태양전력 조절기의 최소 동작 주파수를 구할 수 있다. 위 식과 표 1로부터 인덕터 값을 약 8[μH]로 설정하면, 배터리 전압이 최저 전압인 26[V]일 때 임계모드 부스트형 태양전력 조절기는 최대 전력점 부근에서 약 96[kHz]의 최소 주파수로 동작한다. 한편, 배터리 충전이 완료되면 태양전력 조절기는 배터리 과충전을 막기 위해 배터리 정전압 모드로 동작하고 배터리 충전 전류를 줄인다. 이때 태양전지는 전압원 영역에서 동작하고 태양전지의 전류가 줄어들어 태양전력 조절기의 동작 주파수는 급격히 증가한다. 따라서 최대 주파수를 제한하기 위한 회로가 필요하다.

표 1. 임계모드 부스트형 태양전력 조절기의 입출력 조건

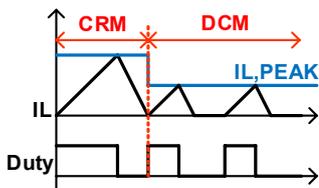
태양전지	개방전압	24[V]
	단락전류	3.8[A]
	최대전력점 전압	20[V]
	최대전력점 전류	3[A]
배터리전압	26[V] ~ 30[V]	

## 2. 최대 동작 주파수 제한 회로

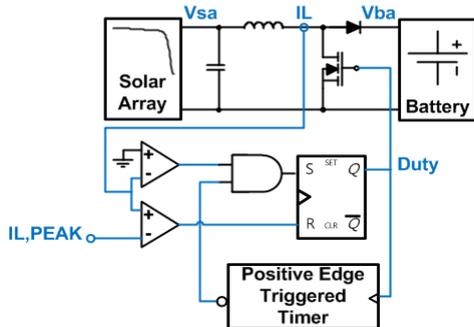
임계모드로 동작하는 DC-DC 컨버터는 인덕터 전류가 작아질수록 스위칭 주파수가 증가한다. 스위칭 주파수가 높아지면 스위치와 인덕터의 전력손실이 증가한다. 임계모드 부스트형 태양전력 조절기는 설정된 최대 주파수 보다 높게 동작해야 할 경우, 불연속전류모드로 동작시켜 최대 주파수를 제한한다. 이를 위한 제어회로를 그림 2에 나타내었다. 태양전력 조절기를 제어하는 듀티가 High 상태가 되는 순간, Timer는 듀티의 Positive Edge에서 동작을 시작한다. Timer가 동작을 시작하여 설정된 시간동안 Low신호를 출력하고, 설정 시간이 지나면 High신호를 출력한다. 듀티가 High 상태가 되어 인덕터 전류가  $I_{L,PEAK}$ 값까지 증가하면, 듀티는 Low 상태로 바뀌고 인덕터 전류는 감소하기 시작한다. 인덕터 전류가 감소하는 동안 Timer의 설정시간이 지나면 Timer는 High를 출력한다. 그 후 인덕터 전류가 0[A]가 되면, Duty가 다시 On이 되어 인덕터 전류가 증가하여 임계모드로 동작하게 된다. 한편, Timer가 동작하는 동안은 인덕터 전류가 0[A]가 되어도 Timer가 Duty가 High 상태가 되는 것을 막는다. 따라서 스위치는 켜지지 않고 인덕터 전류는 0[A]를 유지하고 불연속전류모드로 동작한다. Timer가 설정된 시간을 넘기면 Low 신호를 출력하고, 듀티는 High 상태가 되어 인덕터 전류가 증가한다. 이러한 방식으로 최대 주파수를 제한할 수 있다.



(a) 최대 주파수 제한이 없는 경우 인덕터 파형



(b) 최대 주파수를 제한한 경우 인덕터 파형



(c) 최대 주파수를 제한하기 위한 제어회로

그림 2. 최대 주파수가 제한된 임계모드 부스트형 태양전력 조절기의 인덕터 파형

## 3. 제어기 설계

임계모드로 동작하는 태양전력 조절기의 제어기준 전압에서 인덕터 전류까지 소신호 관계는 아래와 같다[3].

$$\hat{i}_l = \frac{1}{2} \hat{i}_{il,peak}$$

위 식을 바탕으로 소신호 등가회로를 이용하면 제어 기준 값  $I_{L,PEAK}$ 에서 태양전지 전압까지 소신호 전달함수를 아래 식과 같이 구할 수 있다. 임계모드로 동작하는 경우 전달함수 파라미터는 태양전지의 소신호 저항  $r_{sa}$ , 캐패시터 값  $C$ , 캐패시터의 ESR(Equivalent Series Resistance) 값  $r_c$ 로만 구성된다. 인덕터의 값은 전달함수에서 제거되어 제어 안정도에 인덕터 값의 영향을 주지 않는다. 또한 전달함수가 Pole 하나와 Zero 하나로 구성되어 제어기 설계가 간단해진다.

$$\hat{i}_{sa} = \hat{i}_c + \hat{i}_l, \hat{v}_{sa} = \frac{\hat{v}_{sa}}{r_{sa}}, \hat{i}_c = \frac{sC}{r_c Cs + 1} \hat{v}_{sa}$$

$$\frac{\hat{v}_{sa}}{\hat{i}_{il,peak}} = -\frac{(-r_{sa})}{2} \frac{(r_c Cs + 1)}{(r_c - r_{sa})Cs + 1}$$

태양전지의 전압을 제어하기 위해 아래 식과 같이 전압 제어기를 설계하였다. 전압제어기는 큰 DC Gain을 얻기 위한 적분기와, 적분기로 감소된 Phase를 보상하고 Middle band Gain 확보를 위한 Zero, 스위칭 주파수를 감쇠하기 위한 Pole로 구성하였다. 제어기 파라미터 값은 표 2에 나타내었고, 전압제어기로 제어되는 임계모드 부스트형 태양전력 조절기의 최대전력점에서 Loop Gain을 그림 3에 나타내었다.

$$H(s) = \frac{w_i}{s} \frac{1 + \frac{s}{w_z}}{1 + \frac{s}{w_p}}$$

표 2. 태양전력 조절기와 평균전류모드 제어기 파라미터

파라미터	값
$r_{sa}$	-0.7694Ω
$r_c$	2mΩ
$C$	100μF
$w_i$	10krad/sec
$w_z$	$2\pi \times 0.05$ krad/sec
$w_p$	$2\pi \times 200$ krad/sec

## III. 모의실험

MATLAB SIMULINK로 그림 4와 같이 Testbed를 구성하여 모의실험을 진행하였다. 모의실험에 사용한 태양전지

전압과 배터리 전압은 표1과 같고 전압제어기 파라미터는 표2와 같다. 최대 주파수 제한 로직을 사용하여 스위칭 주파수는 200[kHz]로 제한하였다. 전압제어기의 제어기준전압을 0.5[V]씩 증가시켜 태양전지 전 영역에서 동작시켰다. 태양전지의 전압이 증가할수록 태양전지의 전류는 감소하여, 인덕터의 주파수가 증가한다. 이 때 주파수 제한 로직이 인덕터의 주파수를 제한하여 부스트형 태양전력 조절기는 불연속전류모드로 동작함을 확인할 수 있다.

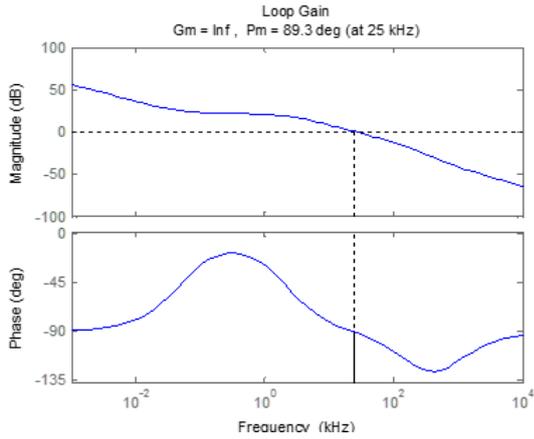


그림 3. 임계모드 부스트형 태양전력 조절기의 최대전력점에서 Loop Gain

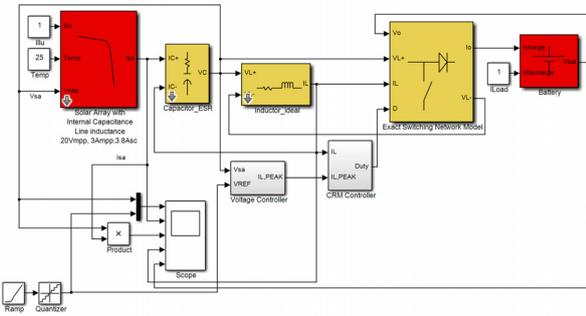
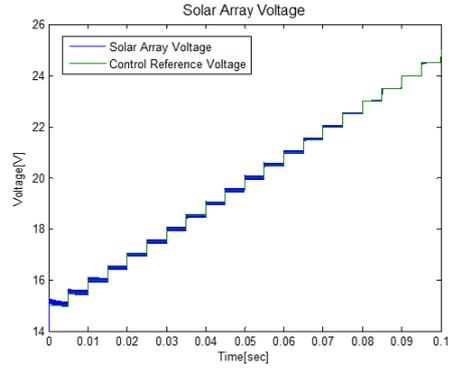


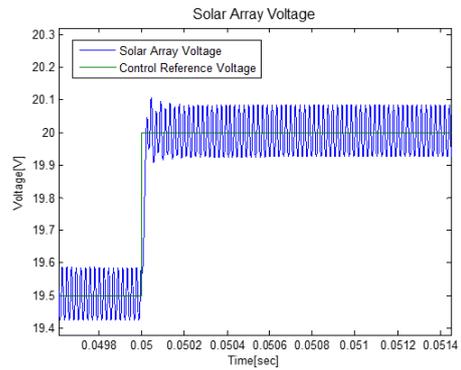
그림 4. 모의 실험을 위한 Testbed

#### IV. 결론

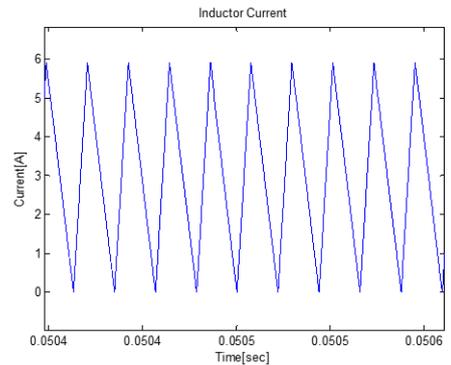
이 논문에서는 부피를 줄이고 효율을 향상시킬 수 있는 임계모드에서 동작하는 부스트형 DC-DC 컨버터를 태양전력 조절기에 적용하였다. 태양전력 조절기의 입출력 관계에 따라 태양전력 조절기의 동작 주파수가 증가하는데 이를 방지하기 위해 최대 주파수 제한 회로를 적용하였다. 임계모드로 동작하는 태양전력 조절기는 소신호 전달함수는 Pole 하나나 Zero하나로 구성되어 제어기 설계가 간단해진다. 전달함수를 바탕으로 전압제어기를 설계하였고, 동작을 검증하기 위해 Testbed를 구성하여 모의실험을 진행하였다.



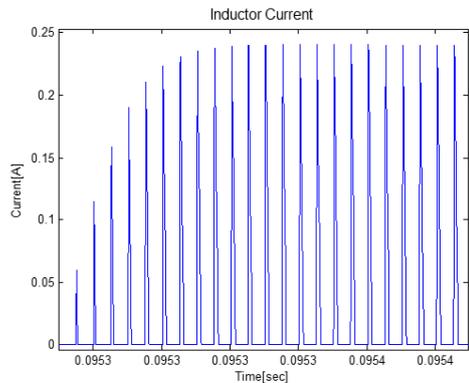
(a) 제어기준전압과 태양전지 전압



(b) 임계모드의 태양전지전압



(c) 임계모드의 인덕터 전류



(d) 불연속전류모드의 인덕터 전류

그림 5. 모의실험 결과

## 참 고 문 헌

- [1] Wei Wen and Yim-Shu Lee, "A Two-Channel Interleaved Boost Converter with Reduced Core Loss and Copper Loss", PESC 04, vol.2, pp. 1003-1009, 2004
- [2] Viswanathan, K, Oruganti, R, Srinivasan, D. "Tri-state boost converter with no right half plane zero", Power Electronics and Drive Systems, vol. 2, pp. 687-693, 2001
- [3] Jingquan Chen, Robert Erickson, and Dragan Maksimovic "Averaged Switch Modeling of Boundary Condition Mode Dc-to-Dc Converters", IECON '01, vol. 2, pp 844-849, 2001.

## 저자

### 양 정 환(JeongHwan Yang)



- 2006년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터 공학부 학사졸업
- 2008년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터 공학부 석사졸업
- 2011년 ~ 현재 : 한국항공우주연구원

<관심분야> : 위성용 전력회로, 전력회로 제어 및 모델링

### 유 상 범(SangBurm Ryu)



- 1996년 2월 : 한밭대학교 전자공학과 학사졸업
- 2001년 2월 : 충북대학교 전자공학과 석사졸업
- 2010년 8월 : 충북대학교 전자공학과 박사졸업

· 2011년 ~ 현재 : 한국항공우주연구원

<관심분야> : 지구관측 위성, 마이크로파 원격 탐사, 인공위성, 디지털 통신

### 윤 석 택(SeokTeak Yun)



- 2005년 7월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 학사졸업
- 2007년 8월 : 서울대학교 전기컴퓨터 공학부 석사졸업
- 2007년 ~ 현재 : 한국항공우주연구원

<관심분야> : 위성 설계/운영, 위성용 전력회로