

소형 태양광 시스템 부스트 컨버터의 효율 분석

이국선* 최익* 최주엽** 안진웅*** 이동하***

광운대학교 제어계측공학과* 광운대학교 전기공학과** 대구경북과학기술원***

Efficiency analysis of the boost converter for compact solar array system

Kook-Sun Lee* Ick Choy* Ju-Yeop Choi** Jinung An***, Dong-Ha Lee***

Dept. of Information and Control Eng. Kwangwoon Univ. *

Dept. of Electrical Eng. Kwangwoon Univ. **

Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology***

Abstract

It is important to know character about efficiency of converters before manufacturing it. Recently, various techniques are developed for solar array system. Converters can be used for control of solar array's condition. So, solar array with converter structures are very useful. If we want to measure converter's efficiency after manufacturing it. It's not difficult if we have measuring equipment. But we need to measure efficiency before realization converters for development of optimized efficiency and simulations.

This research offers an efficiency calculation of single phase hard switching boost converter. And it is the most basic type of converters. In fact, it can be used techniques for getting higher efficiency like soft-switching and more. But the cost is an important issue in compact solar array system. One way to escape from the cost problem is finding optimized efficiency of basic types of converter.

Keywords : 컨버터(converter), 효율 계산(efficiency calculation), 부스트 컨버터(boost converter)

기 호 설 명

i_X : Current of X
 I_X : Average current of X
 $I_{X,rms}$: rms current of X
 V_X : Average voltage of X
 P_{XC} : Conduction loss of X
 P_{XS} : Switching loss of X

D : Switch's Duty-ratio
 D_Z : Zero crossing Duty-ratio
 D_o : Output connected Duty-ratio

1. 서 론

대체 에너지원으로 손꼽히는 대표적인 것에는 풍력, 수력, 지력, 태양에너지 등이 존재하며 이중

에서 일반인들이 실생활에서 쉽게 접하고, 지역의 제약을 받지 않으며 또한 다루기 쉬운 것이 태양 에너지라 할 수 있다. 태양에너지는 전 세계인이 동시에 써도 될 만큼 풍부하고 무한한 에너지이다.

태양력을 이용한 태양광 발전은 초기 비용이 다소 들기는 하지만, 장기적으로 볼 때는 비용을 최소화 할 수 있고, 자원고갈과 환경오염을 막을 수 있다는 점에서 실용성은 매우 크다. 이런 특징으로 인하여 중형/대형 태양광 전력 시스템이 많이 연구 되고, 실제로 쓰이고 있다. 또 한, 이러한 풍부한 에너지를 소형 시스템에서도 적용하려는 노력이 지속되었으며 초기 투자 비용이라는 단점은 점차 극복 되고 있다.

본 논문에서는 소형의 태양광 시스템에서 컨버터의 효율 분석을 다룬다. 인터리빙, 소프트 스위칭 등 다양한 기법들이 효율 개선을 위해 사용 되지만 소형 시스템에서 추가비용 증가와 부피 증가는 적지 않은 trade-off로 작용한다. 따라서 가장 기본적인 형태의 컨버터 손실을 자세히 분석 하고 활용 방안을 모색하는 것 또한 해결책이 될 수 있다. 본 연구의 목적은 그림 1의 기본적인 단상 (single phase) 하드 스위칭 부스트 컨버터의 효율을 정확하게 분석 하는 것이다.

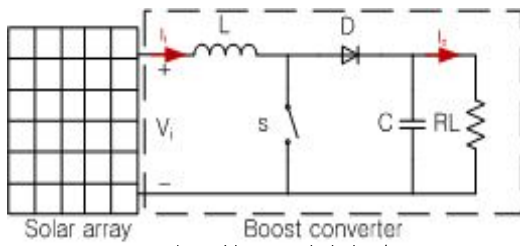


그림 1. 부스트 컨버터 회로

2. 컨버터의 효율 측정 방법

이상적인 컨버터의 경우 입력 전력과 출력 전력이 동일 하지만 실제의 경우 각 소자에서 발생하는 손실로 인하여 입력 전력과 출력 전력은 동일하지 않다.

2.1 컨버터의 효율 측정

컨버터의 효율은 실험이나 계산적으로 측정이 가능 하다. 본 논문에서는 후자를 다루므로 실험적 측정 방식과의 차이점을 분명히 짚고 넘어갈 필요가 있다.

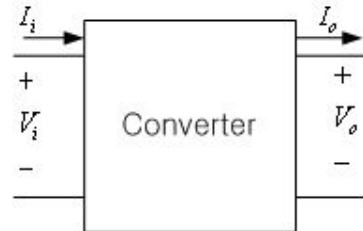


그림 2. 컨버터의 입/출력 관계

(1) Ideal case

Ideal한 Duty-ratio(수식 2)는 쉽게 계산 가능하고 효율은 당연히 100[%]이다.(수식 4)

$$P_i = P_o \quad (1)$$

$$D = \frac{V_o - V_i}{V_o} \quad (2)$$

$$I_i = \frac{I_o}{1 - D} \quad (3)$$

$$\eta[\%] = \frac{P_o}{P_i} 100 = 100 \quad (4)$$

(2) Non-Ideal case

손실이 있는 경우 Duty-ratio는 수식 2에 비하여 훨씬 복잡하며 우리가 구해야 할 변수가 된다. 이를 구하는 방법은 뒤에서 설명한다.

D : Unknown

$M(D)$: Unknown Duty-ratio function (5)

$$P_i = P_o + P_{loss} \quad (6)$$

$$I_i = M(D) I_o \quad (7)$$

$$\eta[\%] = \frac{P_o}{P_i} 100 = \frac{(P_i - P_{loss})}{P_i} 100 \quad (8)$$

2.2 실험적 측정

입/출력 전압과 전류는 측정 가능하며, 그

때의 Duty-ratio 역시 제어기에서 발생하므로 당연히 알 수 있다. 따라서 별도의 복잡한 수식 전개 과정 없이도 간단하게 효율을 계산할 수 있다. 그러나 이러한 상황에서는 이미 컨버터 구현이 완료된 상황이므로 설계 과정에서 반영할 수 없다. 따라서 계산적 접근법이 필요하다.

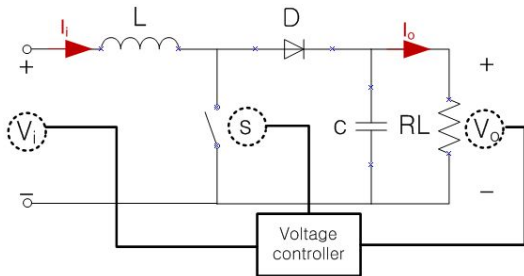


그림 3. 전압 제어기가 포함된 부스트 컨버터

2.3 계산에 의한 측정

100% 실제 효율과 일치하는 계산이란 불가능하다. 그러나 계산적 접근 방식은 구현 이전에 대상 컨버터의 예상 자료로 활용될 수 있기 때문에 의미가 있다. 계산적으로 효율을 구하는 방법은 아래와 같다.

- step 1. 시스템의 출력 전력과 입력 전압을 가정한다. 입력 전류 역시 Duty-ratio의 함수로 나타낼 수 있다고 가정한다.¹⁾

$$\begin{aligned} P_o &= V_o I_o \\ P_i &= V_i I_i = M(D) V_i I_o \end{aligned} \quad (9)$$

- step 2. 수식 6를 Duty의 함수로 표현한다.

$$P_i(D) = P_o(D) + P_{loss}(D) \quad (10)$$

- step 3. 수식 10은 고차의 다항식 f(D)로 볼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_i(D) &= P_o(D) + P_{loss}(D) \\ 0 &= P_o(D) + P_{loss}(D) - P_i(D) = f(D) \end{aligned} \quad (11)$$

- step 4. f(D)는 n차의 D에 대한 고차 다항식이다. 따라서 수치 해석적인 방법으로 D

값을 구할 수 있다. 결국 D는 손실이 있는 경우의 Duty-ratio에 해당한다.

- step 5. 최종적으로 구한 Duty-ratio를 이용하여 효율을 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_o &= V_o I_o \\ P_i &= V_i I_i = M(D) V_i I_o \\ \eta &= \frac{P_o}{P_i} = \frac{V_o}{M(D) V_i} \end{aligned} \quad (12)$$

3. 컨버터의 전류 분석

각 소자에 흐르는 전류를 분석하는 것은 효율 분석의 기반이 된다.²⁾ 컨버터는 부하에 따라서 CCM, DCM으로 동작 영역이 구분되며, 각각의 동작 영역에 따라서 전류 파형도 변화한다.

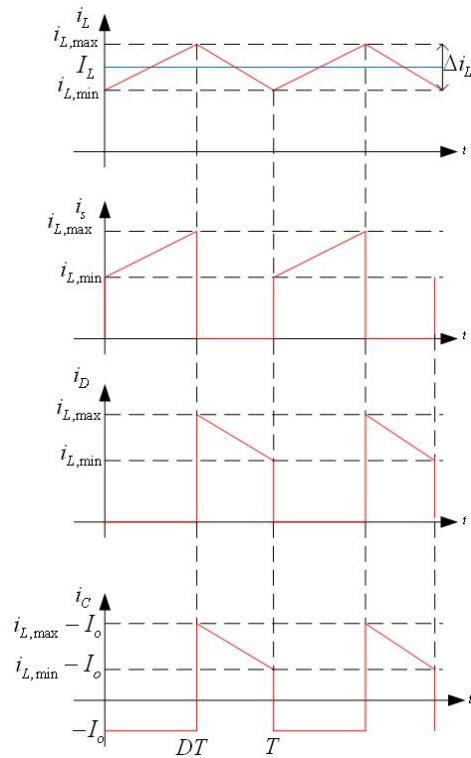


그림 4. CCM 모드 전류 파형

1) 이 외에도 여러 가지 방법이 있을 수 있다.

ex) 입력 전력과 출력 전압을 가정하고 출력 전류를 입력 전류와 Duty의 함수로 표현

2) 인덕터의 전류 역시 Ideal 하지 않기 때문에 이로 인해 오차가 발생함을 미리 밝혀 둔다.

3.1 CCM 전류 파형 분석

그림 4는 CCM 모드에서 컨버터의 각 소자에서 흐르는 전류 파형이다.

인덕터의 전류는 평균 DC 전류와 삼각파의 합성으로 볼 수 있다. 따라서 수식 13과 같이 간단하게 구할 수 있다. 뿐만 아니라 인덕터의 평균 전류는 입력 전류와 같으므로 수식3에서 이미 구하였다.

$$I_L = \frac{I_o}{(1-D)} \quad I_{L,rms}^2 = I_L^2 + \frac{\Delta i_L^2}{12} \quad (13)$$

모든 파형이 인덕터의 전류와 면적의 연관성을 가지므로 아래와 같이 간단하게 정리된다.

$$I_S = DI_L \quad I_{S,rms}^2 = DI_{L,rms}^2 \quad (14)$$

$$I_D = (1-D)I_L \quad I_{D,rms}^2 = (1-D)I_{L,rms}^2 \quad (15)$$

$$I_{C,rms}^2 = (1-D)I_{L,rms}^2 - I_o^2 \quad (16)$$

3.2 DCM 전류 파형 분석

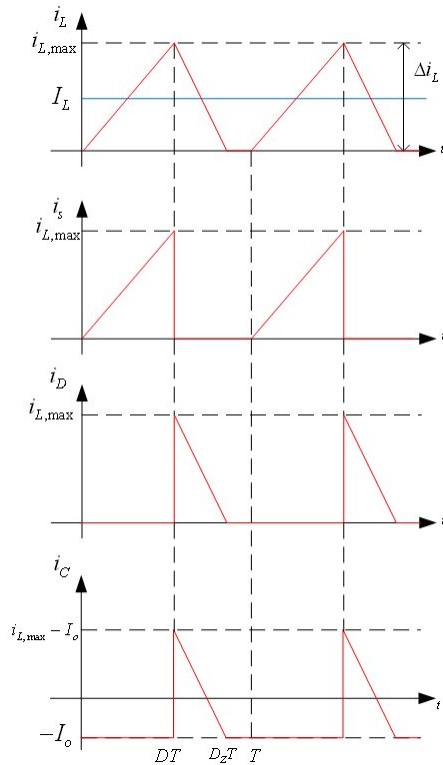


그림 5. DCM 모드 전류 파형

3.2 DCM 전류 파형 분석

DCM 모드 역시 CCM모드와 비슷한 방법으로 각 소자의 전류를 구할 수 있다.

$$I_L = \frac{\Delta i_L}{2} D_Z \quad I_{L,rms}^2 = \frac{\Delta i_L^2}{3} D_Z \quad (17)$$

$$I_S = \frac{D}{D_Z} I_L \quad I_{S,rms}^2 = \frac{D}{D_Z} I_{L,rms}^2 \quad (18)$$

$$I_D = \frac{(D_Z - D)}{D_Z} I_L \quad I_{D,rms}^2 = \frac{(D_Z - D)}{D_Z} I_{L,rms}^2 \quad (19)$$

$$I_{C,rms}^2 = \frac{(D_Z - D)}{D_Z} I_{L,rms}^2 - I_o^2 \quad (20)$$

4. 컨버터의 손실 분석

3장에서 구한 전류를 이용 하여 각 손실을 정의 할 수 있다.

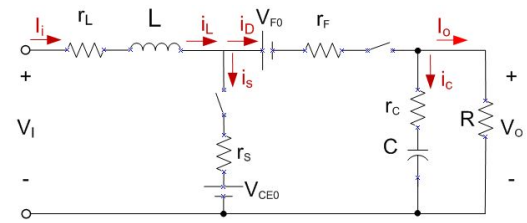


그림 6. 손실이 포함된 컨버터 회로

4.1 인덕터의 손실

인덕터의 기생 저항 r_L 로 인하여 손실이 발생 한다.

$$P_{LC} = r_L I_{L,rms}^2 \quad (21)$$

4.2 캐패시터의 손실

인덕터와 마찬가지로 r_C 로 인하여 손실이 발생 한다.

$$P_{CC} = r_C I_{C,rms}^2 \quad (22)$$

4.3 스위치의 손실

스위치의 손실에는 도통 손실과 스위칭 손실이 있다. 또 한, 스위치 종류에 따라서 적합한 손실 계산법을 선택 할 수 있다.

본 논문에서는 MOSFET과 IGBT를 비교 설명 하겠다.[3]

(1) 도통 손실

MOSFET이 도통 시 출력단 단순히 저항 r_s 로 인하여 손실이 발생 한다. IGBT의 경우 출력단은 BJT로 보고, V_{CB} 와 r_s 로 인한 손실로 볼 수 있다. 따라서 23식은 IGBT의 도통 손실을 나타낸다.

$$P_{SC} = V_{CB}I_S + r_s I_{S,rms}^2 \quad (23)$$

(2) 스위칭 손실

스위칭 손실은 on/off 시 상승 시간과 하강 시간에 의하여 그 순간의 전압과 전류의 곱으로 표현 된다. 이론적 접근법은 상승 시간과 하강시간을 이용 하여 그림 7과 같은 상황을 분석 하는 것이다.

그러나 실험값과 오차가 큰 편이다. 특히 IGBT의 경우 current-tailing 현상으로 인하여 turn-off 손실에 오차가 더욱 커진다.

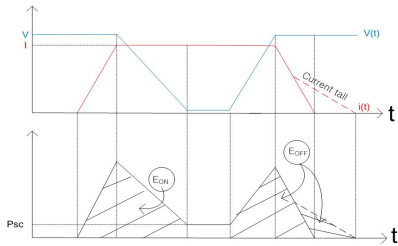


그림 7. 스위칭 손실과 에너지 그래프

따라서 두 번째 방법은 데이터 시트의 손실 에너지 그래프를 이용 하는 것이다. 그림 8에서 각 손실들은 기울기 a와 y절편 E0를 갖는 1차 함수로 근사화 가능하다.

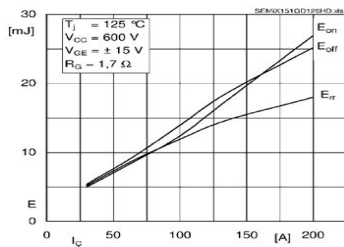


그림 8. 손실 에너지 그래프

그림 8에서 스위칭 전류와 소모되는 에너지 사이에는 비례 관계가 있다. 뿐만 아니라 그림 7에서 스위칭 전압과 역시 비례 관계가 있음을 유추 할 수 있다.

$$W_{S,on} = a_{on} \left(I_L - \frac{\Delta i_L}{2} \right) + E_{on0} \quad (24)$$

$$W_{S,off} = a_{ff} \left(I_L + \frac{\Delta i_L}{2} \right) + E_{off0} \quad (25)$$

$$P_{SS,on} = f_s W_{S,on} \frac{V_{CC}}{600} \quad (26)$$

$$P_{SS,off} = f_s W_{S,off} \frac{V_{CC}}{600} \quad (27)$$

26,27 식의 ($V_{cc}/600$)을 곱하는 이유는 그림 8의 데이터 시트가 $V_{cc}=600V$ 에서 구한 것이므로 스위칭 손실이 V_{cc} 에 비례 할 것으로 가정 한 것이다.

본래 24,25식을 이용하여 수식 28로 스위칭 손실을 구해야 하나 계산의 간단히 하기 위해서 29 식으로 근사화 하여 사용 하겠다.³⁾

$$P_{SS} = P_{SS,on} + P_{SS,off} \quad (28)$$

$$P_{SS} = \{ (a_{ff} + a_{on}) I_L + (E_{off0} + E_{on0}) \} \frac{f_s V_{CC}}{600} \quad (29)$$

4.4 다이오드의 손실

다이오드 역시 Reverse recovery 현상으로 인한 스위칭 손실과 Foward voltage drop으로 인한 도통 손실이 있다.

(1) 도통 손실

$$P_{DC} = V_{FD}I_D + r_F I_{D,rms}^2 \quad (30)$$

(2) 스위칭 손실

다이오드의 스위칭 손실은 4.3절에 한 것과 마찬가지로 데이터 시트에서 구하고 근사화 한다면 수식 31로 나타 낼 수 있다.

$$P_{DS} = f_s (a_{rr} I_L + E_{rr0}) \frac{V_{CC}}{600} \quad (31)$$

3) 본 수식은 편의를 위해서 많이 근사화 되어 있고, 간략화 시킨 것이다. 따라서 더욱 정확한 모델을 원한다면 설계자가 변경 할 수 있다. 그러나 반드시 Duty의 함수로 표현 되어 한다.

29식과 31식을 합하여 스위치와 다이오드의 총 스위칭 손실은 수식 32로 나타 낼 수 있다.

$$a = a_{ff} + a_{on} + a_{rr}$$

$$E_0 = E_{off0} + E_{on0} + E_{rr0}$$

$$P_S = P_{DS} + P_{SS} = (aI_L + E_0) \frac{f_s V_{CC}}{600} \quad (32)$$

5. 시뮬레이션

$V_i[V]$	12	$V_o[V]$	48
fs[khz]	10	L[uH]	25
$r_L[mOhm]$	1	$r_C[mOhm]$	0.1
$V_{CE0}[V]$	1.2	$r_{CE}[mOhm]$	13.5
$V_{F0}[V]$	1.2	$r_F[mOhm]$	8
a_{on}	0.119e-3	$E_{on0}[mJ]$	1.304
a_{off}	0.125e-3	$E_{off0}[mJ]$	1.605
a_{rr}	0.0858e-3	$E_{rr0}[mJ]$	3.087

표 1. 시뮬레이션 파라미터 테이블

표 1의 파라미터들을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과는 그림 9와 같다.

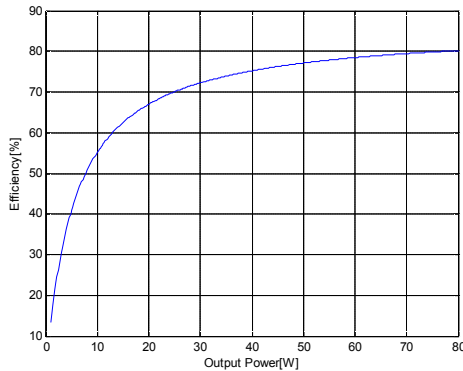


그림 9. 시뮬레이션 결과

6. 결 론

본 논문에서는 가장 기본적인 형태의 부스트 컨버터 효율 분석법을 제시 하였다. 제시한 분석 방식의 장점은 아래와 같다.

- 데이터 시트를 활용하여 실험값과 오차를 줄일 수 있다.

- 손실에 의해서 변동하는 Duty가 반영 되어 있다.

반면, 단점은 아래와 같다.

- 인덕터 전류를 Ideal하게 가정 함으로써 오차가 발생한다.

- 손실 term이 많아 질수록 고차 다항식의 수식 전개가 복잡해 진다.

단점으로 인하여 상황에 따라서 CCM과 DCM의 경계치에서 오차가 크게 발생 할 수 있다. 그러나 대개의 경우 전체 효율에 비하여 그 오차는 무시할 수 있을 정도로 작다.

참 고 문 헌

1. T. Eichhorn, "Boost Converter Efficiency Through Accurate Calculations," Power Electronics Technology, pp.30-35, Sep. 2008.
2. W. Aloisi, G. Palumbo "Eciency model of boost dc - dc PWM converters,"Int. J. Circ. Theor. Appl. 2005; 33:419 - 432.
3. Chesley Chao, *Using WARP Speed™ IGBTs In Place Of Power MOSFETs at Over 100kHz Converter Applications*, Int. RECTIFIER CORPORATION