

역률개선을 위해 경계전류모드로 동작하는 브리지리스 부스트 컨버터

유병규, 이성세, 한상규, 문건우
한국과학기술원

Boundary Current Mode Operated Bridgeless Boost Converter for Power Factor Correction

Byung-Gyu Yu, Sung-Se Lee, Sang-Kyu Han, and Gun-Woo Moon
KAIST

ABSTRACT

Recently, many nations have released standard such as IEC 1000-3-2 and IEEE 519 which impose a limit on the harmonic current drawn by equipment connected to AC line in order to prevent the distortion of an AC line.

Among the wide variety of active methods for improving power factor and harmonic distortion, the boost converter is very effective because it has a continuous line current, small choke filter and high power factor. In high power application, however, the bridge diode loss in the boost converter has made the efficiency lower and the temperature of the board higher. A new approach without bridge diode to make the same characteristics of the conventional boost converter has also been developed. This paper present the comparisons between the continuous current mode(CCM) operated conventional boost converter and the boundary current mode(BCM) operated the bridgeless boost converter for high efficiency and high power factor.

1. 서론

전자기기에서 발생하는 고조파성분은 동일한 계통에 연결되어 있는 다른 전자기기에 오동작과 같은 문제를 일으키기 때문에, 국제적으로 IEC 1000-3-2와 같은 국제규격을 통해서 그 고조파 수치를 제한하고 있다. 이러한 제한사항을 만족시키기 위해 고조파 성분을 제거한 높은 역률을 갖도록 하는 역률 개선기가 연구되어 왔다. 현재 부스트 컨버터가 작은 초크 필터 및 높은 역률을 갖기 때문에 역률개선용으로 가장 많이 사용되고 있다. 그러나 대전력 응용시 부스트 컨버터의 브리지 다

이오드에서 발생하는 손실이 전체 손실의 가장 큰 부분을 차지하며, 시스템 온도 상승의 주요 원인이 되고 있다. 따라서 이러한 문제점들을 해결하기 위해 브리지 다이오드가 필요 없는 구조의 브리지리스(Bridgeless) 부스트 컨버터를 생각해 볼 수 있다.^[1] 본 논문은 중급이상 용량에서 가장 많이 사용되는 연속전류모드로 동작하는 기존의 부스트컨버터(이하 CCMCBC)와 경계전류모드로 동작하는 브리지리스 부스트컨버터(이하 BCMBBC)를 효율과 역률 관점에서 비교 및 분석하였다.

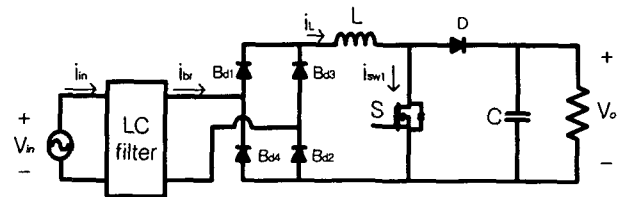


그림 1 기존의 부스트 컨버터

Fig. 1 Conventional Boost Converter

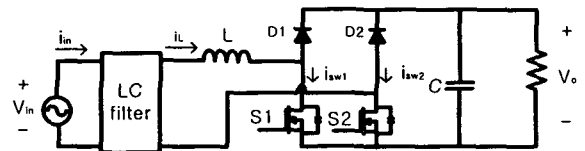


그림 2 브리지리스 부스트 컨버터

Fig. 2 Bridgeless Boost Converter

2. 역률 개선을 위한 부스트 컨버터

2.1 기본 동작 특성

그림 2에 나타나 있는 브리지리스 부스트 컨버터는 그림 1의 기존의 부스트와 마찬가지로, 스위치가 도통 되어 있을 경우에는 인덕터에 입력전압이

인가되고, 스위치가 오프되어 있을 경우에는 입력 전압과 출력전압의 차가 인가되는 것을 알 수 있다. 여기에 인덕터의 전압-시간 평형조건 (Volt-Sec Balance)을 적용시켜 보면 출력전압이 입력전압 보다 크게 나타나는 부스트 컨버터의 특성을 가짐을 알 수 있다. 또한 스위치의 전압 및 전류 스트레스 역시 출력전압, 입력 전류로 동일함을 알 수 있다. MOSFET 스위치의 소스가 전력단의 접지와 같으므로 게이트 소스 전압을 구동하기가 쉬운 점도 동일하다.

그러나 주 전류 경로 상에 기존의 부스트 컨버터는 스위치 온/오프에 관계없이 항상 3개의 반도체 소자가 도통하는 반면에, 브리지리스 부스트 컨버터의 주 전류 경로 상에는 항상 2개의 반도체 소자가 도통하게 된다. 비록 브리지 다이오드보다 소자 가격이 비싼 스위치와 빠른 역회복 특성의 다이오드를 사용하지만, 효율적인 면에서 살펴보았을 때 주 전류 경로 상에 반도체 소자의 개수가 적은 브리지리스 부스트 컨버터가 기존의 부스트 컨버터보다 상당한 전도손실의 감소를 예측할 수 있다.

2.2 역률 개선을 위한 부스트 컨버터 제어 방법

역률개선을 위한 부스트 컨버터의 구동방식에는 크게 인덕터 전류가 연속이나 불연속이나 혹은 연속과 불연속의 경계에서 동작 시키느냐에 따라 세 가지로 나눌 수 있다.

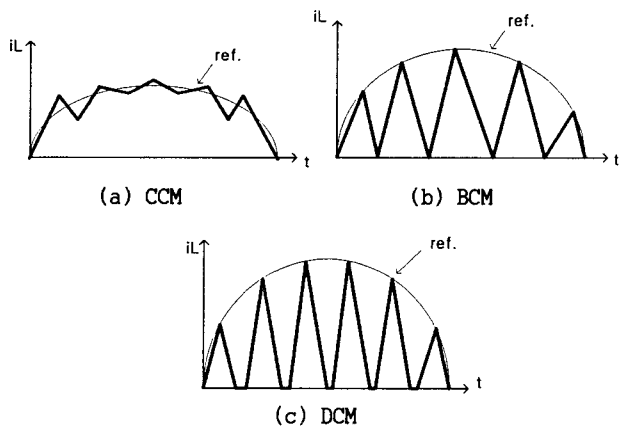


그림 3 역률개선을 위한 전류 제어방법
Fig. 3 Current Control Technique for Power Factor Correction

CCM(Continuous Current Mode)으로 구동되는 부스트 컨버터를 역률 개선용으로 사용할 경우, 다른 두 방식에 비해 인덕터 전류의 실효치가 가장 적어 수백 와트급 이상의 대용량 시스템에 가장 많

이 사용되고 있으나, 전력스위치의 하드스위칭 (Hard Switching) 및 출력 다이오드의 역회복 문제 등의 단점을 보인다.

BCM(Boundary Current Mode)방식은 가변 주파수 제어방법으로 제어가 간단하고, 영전류 스위칭을 하는 장점이 있으나 CCM에 비해 인덕터 전류의 실효치가 크다는 단점이 있어 500[W] 이하의 중급 용량에 많이 사용되고 있다.

DCM(Discontinuous Current Mode) 방법은 일정 주파수 제어방법으로서 BCM과 마찬가지로 영전류 스위칭을 하지만, 다른 방식에 비해 인덕터 전류의 실효치가 가장 크기 때문에 소용량 시스템에 주로 사용되고 있다.

3. 효율예측을 위한 각 부스트 컨버터의 손실 분석

500[W] 급의 각 부스트 컨버터에 대해 손실계산을 통해 각 부스트 컨버터의 효율을 비교해 보도록 한다. 이 때 기존의 부스트 컨버터는 CCM으로 동작 시키고, 반면에 브리지리스 부스트 컨버터는 BCM으로 동작시킨다고 가정한다. 이 때 각 부 주요 파형을 그림 4에 도시한다.

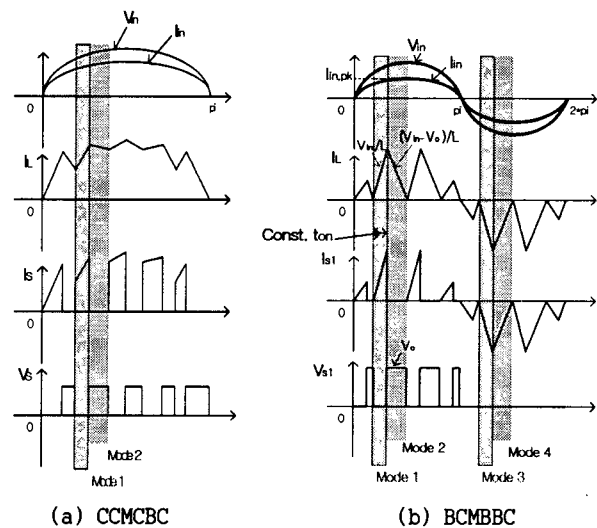


그림 4 각 부스트 컨버터의 주요 파형
Fig. 4 Key Waveform

이 때 손실의 대부분은 반도체 소자에서 주로 발생하므로, 이외의 다른 소자에서 발생하는 손실은 없는 것으로 가정한다. 60[Hz] 반주기에 대해 각 부스트 컨버터에서 손실이 발생하는 주요 반도체 소자를 동작구간별로 정리해 보면 표 1과 같다.

표 1 라인 반 주기 동안 손실이 발생하는 주요 반도체 소자
Table 1 Key Components Generating Power Loss during half AC Line Period

Period Converter	Switch On Time	Switch Off Time	Switching Time
Conventional (CCM)	Bd1, Bd2, S	Bd1, Bd2, D	S, D
Bridgeless (BCM)	S1, S2	D1, S2	S1

3.1 CCMCBC에서의 손실

① 브리지 다이오드에서의 손실

우선 브리지 다이오드에서의 손실은 항상 두 개의 다이오드가 도통하므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{bd,loss} = 2 \times \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} v(t) i(t) d(\omega t) = 2 \times \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_{F,lin,pk} \sin(\omega t) d(\omega t)$$

$$I_{in,pk} = \frac{\sqrt{2}P_o}{\eta V_{in,rms}}$$

$$P_{bd,loss} = 2 \times V_F \frac{2}{\pi} \frac{\sqrt{2}P_o}{\eta V_{in,rms}} [W]$$

② 스위치에서의 손실

다음으로 스위치에서 발생하는 손실은 스위치에 흐르는 전류의 실효치를 우선 구해 도통 손실과 스위칭 손실을 구해 볼 수 있다. 이 때 스위치에서의 스위칭 손실을 구하기 위한 손실 모델은 그림 5(a)에 나타낸 바와 같다.

- 스위치에서 발생하는 도통 손실

$$I_{sw,rms} = I_{in,pk} \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{4V_{in,pk}}{3\pi V_o}} [A]$$

$$P_{loss,con} = R_{ds(on)} \times I_{sw,rms}^2 [W]$$

- 스위치에서 발생하는 스위칭 손실

$$P_{loss,sw} = \frac{1}{3} I_{sw,rms} \times V_o \times f_s \times (t_r + t_f) [W]$$

③ 출력 다이오드에서의 손실

마지막으로 출력 다이오드에서 발생하는 손실을 구해보면 다음과 같다. 이때 다이오드 역회복 손실 계산을 위한 다이오드의 손실 모델은 그림 5(b)에 나타낸 바와 같다.

- 출력 다이오드에서의 도통 손실

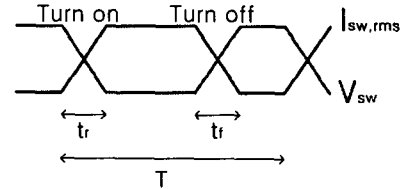
$$I_{D,avg} = \frac{P_o}{V_o} [A]$$

$$P_{loss,con} = I_{D,avg} V_F [W]$$

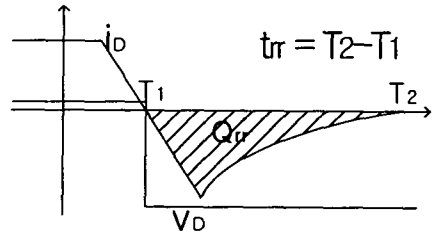
- 출력 다이오드에서의 스위칭 손실

$$I_{D,rms} = 2I_{in,pk} \sqrt{\frac{V_{in,pk}}{3\pi V_o}} [A]$$

$$P_{loss,sw} = \frac{1}{2} I_{D,rms} \times V_o \times f_s \times t_r [W]$$



(a) MOSFET Switching Model



(b) Diode Switching Model

그림 5 기존의 부스트 컨버터의 스위칭 모델

Fig. 5 Conventional Boost Converter Switching Model

3.2 BCMBBC에서의 손실

① 스위치에서의 손실

BCM으로 동작 시킬 경우 스위치의 스위칭 주파수가 가변하기 때문에 스위치에 흐르는 전류의 실효치를 하나의 결과 수식으로 표현하기는 어렵다. 따라서 프로그램을 사용해서 인덕터 전류의 실효치를 구해 본다. 이 때 스위치의 도통시간은 항상 일정하고, 출력전력이 일정하며 AC 입력전압은 한 스위칭 주기에 대해 일정하다고 가정할 수 있다.

이와 같이 구한 스위치 전류의 실효치로부터 스위치에서 발생하는 도통손실과 스위칭 손실을 구할 수 있다. 스위칭 손실을 구하기 위해 사용한 손실 모델은 그림 6에 나타내었다.

- 스위치에서 발생하는 도통 손실

$$I_{sw,rms} = \sqrt{\frac{1}{(1/120)} \left[\int_0^{t_{on}} i_{sw}^2 dt + \int_{T_1}^{T_1+t_{on}} i_{sw}^2 dt + \dots + \int_{T_{n-1}}^{T_{n-1}+t_{on}} i_{sw}^2 dt \right]}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{(1/120)} \left[\int_0^{t_{on}} \left(\frac{V_{in}(t_{on})}{L} t \right)^2 dt + \int_{T_1}^{T_1+t_{on}} \left(\frac{V_{in}(T_1+t_{on})}{L} t \right)^2 dt + \dots \right]} [A]$$

$$P_{sw,con,loss} = 2 \times R_{ds(on)} \times I_{sw,rms}^2 + V_F \times I_o [W]$$

- 스위치에서 발생하는 스위칭 손실

$$P_{sw,swing,loss} = \frac{1}{(1/120)} \int_0^{(1/120)} v_{sw} \times i_{sw} dt$$

$$= \frac{1}{(1/120)} \left[\int_0^{t_r} y_1 \times y_2 dt + \int_0^{t_r} y_3 \times y_4 dt + \dots \right]$$

② 출력 다이오드에서의 손실

출력 다이오드에서 발생하는 손실 중 스위칭 손실은 BCM으로 동작 되므로 무시 할 수 있고, 도통 손실만 존재한다고 본다.

$$P_{d,loss} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} v(t) i(t) d(wt) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_F \times i_D(wt) d(wt)$$

$$= V_F I_{D,avg} = V_F I_o \quad [W]$$

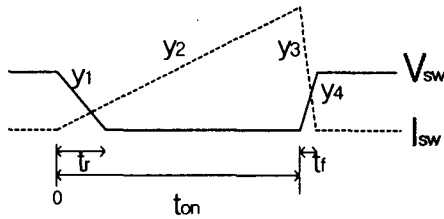
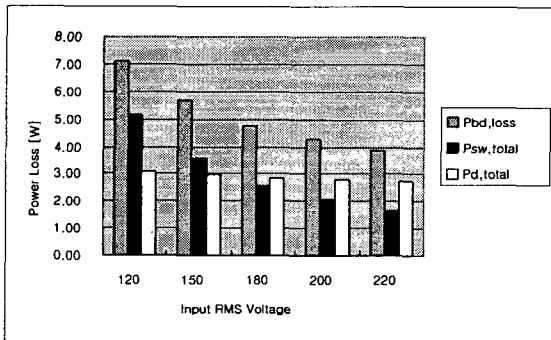
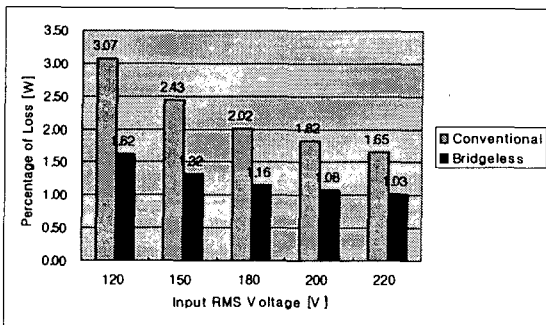


그림 6 브리지리스 부스트 컨버터의 스위치의 스위칭 모델
Fig. 6 Bridgeless Boost Converter MOSFET Switching Model

위에서 구한 식들을 이용해서, 500[W] 급 실험에서 사용된 소자들의 파라미터를 적용하여 구한 각 부 손실은 그림 7과 같다.



(a) Power Loss in CCMCBC



(b) Percentage Power Loss Comparison between CCMCBC and BCMBBC

그림 7 계산된 손실의 비교
Fig. 7 Calculated Loss Comparison

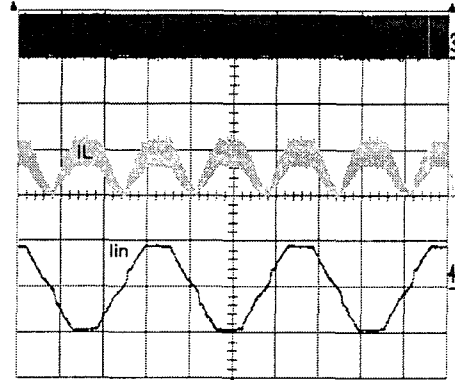
그림 7(a)로 부터 브리지 다이오드에서 발생하는 손실이 전체 손실 중 가장 큰 부분을 차지하는 것을 알 수 있다. 그림 7(b)는 브리지리스 부스트와 기존의 부스트 컨버터의 효율을 입력전압에 따라 비교하고 있다. 브리지리스 부스트 컨버터가 기존의 부스트 컨버터에 비해 전체적으로 대략 1%내외의 우수한 효율을 나타냄을 알 수 있다.

4. 실험결과

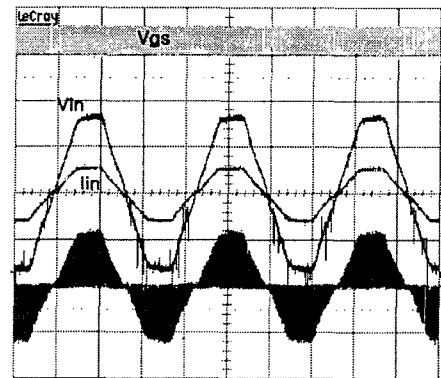
제안된 BCMBBC의 우수성과 동작 및 분석의 타당성을 검증하기 위해 120~220[V_{rms}] 입력에 385[V_{DC}] 출력을 갖는 500[W] 급의 BCMBBC와 CCMCBC의 모델을 제작하여 실험하였다.

CCMCBC의 스위칭 주파수는 60[kHz]로 하였고, 부스트 인덕터는 인덕터 전류 리플을 고려하여 600[uH]로 정하였다. BCMBBC의 경우에는 최소 스위칭 주파수를 고려하여 부스트 인덕터를 170[uH]로 선정하였다.

4.1 주요 실험 파형



Vgs-20[V/div], Iin-5[A/div], IL-5[A/div]; Time=5[msec]
(a) CCMCBC



Vgs-20[V/div], Vin-100[V/div]
Iin-10[A/div], IL-10[A/div]; Time = 5[msec]
(b) BCMBBC

그림 8 주요 실험 결과 파형
Fig. 8 Key Experimental Waveforms

각 주요 실험 파형으로부터 역률을 측정 한 결과 모두 0.99 이상의 높은 역률을 나타내었다.

4.2 효율 비교

효율을 측정 한 결과 그림 8에 나타낸 바와 같이 브리지리스 부스트 컨버터가 대략 1% 정도의 효율 상승을 나타내었다.

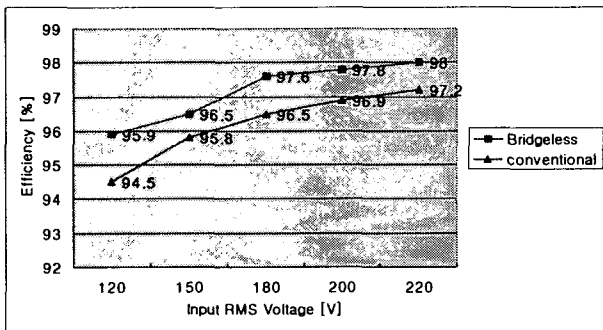


그림 8 효율비교

Fig. 8 Efficiency Comparison

이와 같이 1%의 효율상승은 500[W]급의 PDP(Plasma Display Panel) 전원공급기와 같은 시스템에 있어서 방열판 사이즈의 감소 뿐만 아니라, 전원공급기 보드에서의 내부 온도를 낮출 수 있는 장점이 있다.

5. 결 론

현재 개발되고 있는 역률 개선기중 부스트 컨버터가 작은 초크 필터 및 높은 역률을 갖기 때문에 역률개선용으로 가장 많이 사용되어 왔다. 이에 본 논문에서는 CCMCBC와 제안된 BCMBBC를 비교, 분석하였다. 실험 결과를 통해 각 부스트 컨버터를 비교, 분석한 내용의 타당성을 검증하였고, 브리지리스 부스트 컨버터가 역률 면에서는 기존의 부스트 컨버터와 동일하게 0.99이상의 높은 값을 나타내었으며, 효율 면에서는 기존의 부스트 컨버터에 비해 1[%]정도 개선되었음을 알 수 있었다.

이 논문은 2003년도 정통부 ITRC 지능로봇 연구센터에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

- [1] P. N. Enjeti, and R. Martinez, "A high performance single-phase AC to DC rectifier with input power factor correction", In Proceedings of APEC 1993, pp. 190-196.
- [2] A. Pietkiewicz, and D. Tollik, "New high power

single-phase power factor corrector with soft-switching", Telecommunications Energy Conference, 1996. INTELEC '96., 18th International, 6-10 Oct. 1996

[3] J. Zhang, J. Shao, P. Xu, F. C. Lee, and M.M. Jovanovic " Evaluation of input current in the critical mode boost PFC converter for distributed power systems", APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE , Volume: 1, 4-8 March 2001

[4] J. Liu, W. Chen, J Zhang, D. Xu, and F. C. Lee "Evaluation of power losses in different CCM mode single-phase boost PFC converters via a simulation tool", Industry Applications Conference, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2001 IEEE , Volume: 4, 30 Sept.-4 Oct. 2001