

새로운 주파수 가변형 직렬 부스트 캐패시터(SBC) 풀 브리지 DC/DC 컨버터

신용생, 장영수, 노정욱, 홍성수, 김동중*, 김학용*, 김돈식*, 이효범*, 한상규
국민대학교 전력전자 연구소, *삼성전기(주) P&M 사업부

A New Pulse Frequency Modulation(PFM) Series Boost Capacitor(SBC) Full Bridge DC/DC Converter

Yong-Saeng Shin, Young-Su Jang, Chung-Wook Roh, Sung-Soo Hong,
Dong-Joong Kim*, Hak-Yong Kim*, Don-Sik Kim*, Hyo-Bum Lee*, Sang-Kyoo Han
Kookmin University Power Electronics Center, *Samsung Electro-Mechanics Co., LTD.

ABSTRACT

본 논문은 대용량에 적합한 새로운 DC/DC 컨버터에 관한 것으로서, PFM-SBC(Series-Boost Capacitor) 풀 브리지 컨버터를 제안한다. 제안된 회로는 스위칭 주파수에 따라 직렬 부스트 캐패시터의 전압을 증감하여 출력전압을 제어하는 방식이며, 50% 고정 시비율로 구동하기 때문에 기존 위상천이 풀 브리지 회로에 존재하는 환류 구간이 발생하지 않는다. 또한 넓은 부하 영역에 대해 영전압-스위칭이 보장되므로 효율 및 발열 특성이 우수하며, 출력 인덕터 전류 리플이 작은 장점이 있다. 본 논문에서는 기존 컨버터들의 특성을 분석하고, 제안된 회로의 이론적 해석 및 PSIM 모의실험을 수행하며, 이를 실제로 1.2KW급 서버용 전원장치 프로토타입 제작을 통하여 제안된 SBC 풀 브리지 컨버터의 타당성을 검증한다.

1. 서론

일반적으로 중·대용량 DC/DC 컨버터에 적용 가능한 전력 변환회로로는 Single Ended 능동 클램프 포워드 컨버터, Double Ended 능동 클램프 포워드 컨버터, 비대칭 하프 브리지 컨버터, LLC 공진형 컨버터, 위상천이 풀 브리지 컨버터 등이 있다. 이 중 위상천이 풀 브리지 컨버터가 높은 스위칭 주파수로 동작하면서도 스위칭 손실과 출력 인덕터 전류 리플이 비교적 적은 전력변환 회로로서, 광범위하게 사용되고 있다. 그러나 상기 컨버터는 순간 정전 및 입력전압 변동에 대한 동작 마진을 확보하기 위해 정상동작 시 구동 시비율 D를 30~35% 정도로 하는 것이 일반적이다. 이로 인해 그림2 에서와 같은 환류구간이 존재하여 도통 손실 및 소자 발열이 증가하며, 출력 인덕터 리플전류가 커지는 단점이 존재한다. 뿐만 아니라, 낮은 부하조건에서 지상레그 스위치의 영전압 스위칭이 보장되지 못하여 스위칭 손실이 크고 EMI 측면에서도 불리하다.

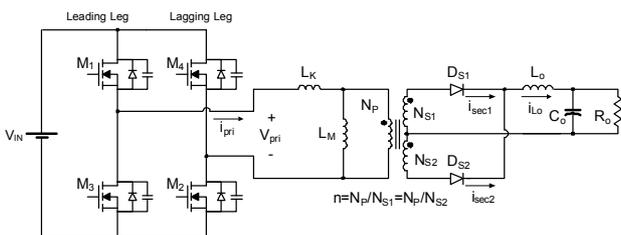


그림 1 위상천이 풀 브리지 컨버터

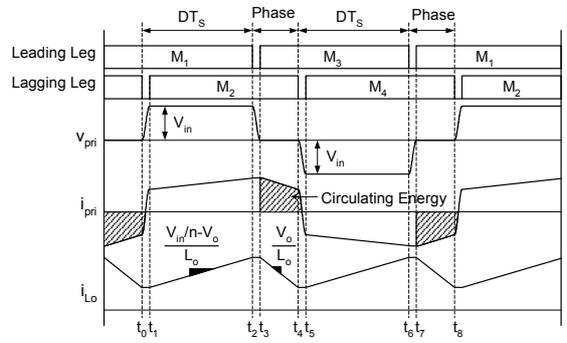


그림 2 위상천이 풀 브리지 컨버터의 주요 동작 파형

2. 주파수 가변형 직렬 부스트 캐패시터(SBC) 풀 브리지 DC/DC 컨버터

기존 위상천이 풀 브리지 컨버터가 위상차이에 따른 펄스 폭 제어에 따라 출력전압이 제어되는데 반해 제안된 PFM-SBC 풀 브리지 컨버터는 50% 고정 시비율을 가지고 주파수 제어에 따라 출력전압이 제어되는 것이 특징이다. 따라서 넓은 부하 영역에서 영전압 스위칭이 가능하며, 환류구간이 거의 존재하지 않는다. 또한 변압기 이용률이 높고, 1차측 전류의 RMS 및 Peak값이 줄어들게 되어 효율 및 발열 측면에서 매우 유리하다. 제안된 컨버터는 일반적인 공진형 컨버터와는 다르게 출력 인덕터가 존재하며 50% 고정 시비율로 동작하므로 출력 인덕터 전류 리플이 작아 소자 전류 스트레스 측면에서 매우 유리하다. 그림 3과 4에 제안된 PFM-SBC 풀 브리지 컨버터의 구조 및 주요 동작파형을 나타내고 있다.

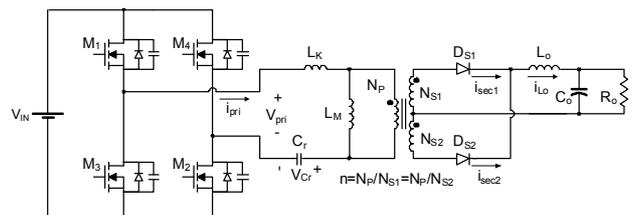


그림 3 제안된 SBC 풀 브리지 컨버터

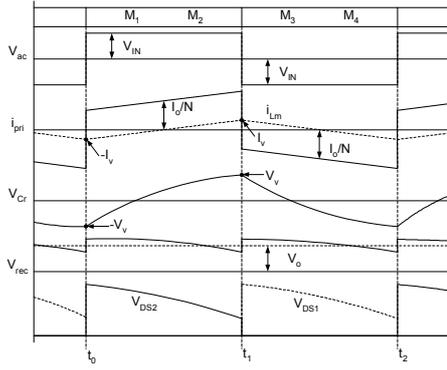


그림 4 제안된 SBC 풀 브리지 컨버터의 주요 동작 파형

2.1 제안회로의 동작원리

그림 5는 주파수에 따른 정류된 트랜스포머 2차측 전압파형 V_{rec} 를 보이고 있다. 정류된 2차측 전압 V_{rec} 는 $(V_{in}+V_{cr})/N$ 으로 나타나며 V_{in} 은 일정하므로 V_{cr} 에 따라 그 파형이 달라진다. V_{cr} 의 전압은 C_r 과 L_m 의 공진으로 인해 주파수가 작을수록 그 최대치는 커진다. 한편, 출력전압은 정류된 2차측 전압이 출력 LC필터에 의해 평활되어 나타나므로 V_{rec} 의 평균이 된다. 그림에서 보인바와 같이 주파수가 작을수록 면적 A보다 면적 B가 더 커지게 되어 V_{rec} 의 출력전압은 증가하게 된다. 결국 제안된 회로는 면적 A와 면적 B의 크기를 주파수에 따라 가변하여 출력전압을 Regulation하게 된다.

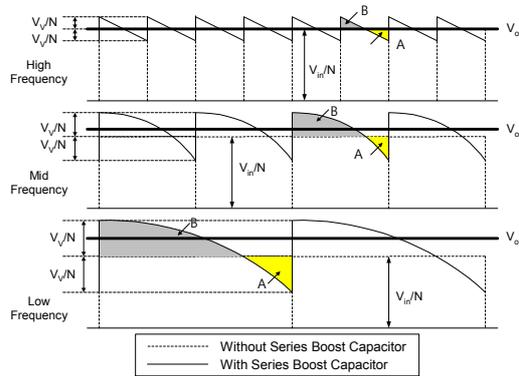


그림 5 주파수에 따른 정류된 트랜스포머 2차 측 전압 파형

2.2 입출력 관계식

입출력 관계식 도출의 편의를 위해 몇 가지 가정을 둔다.

- 출력 인덕터 L_o 전류는 I_o 로 일정하다.
- 스위치 M1과 M3 또는 M2와 M4 사이의 Dead time은 무시할 수 있을 만큼 작다.
- i_{ps1} 과 i_{ps2} 의 평균전류는 $I_o/2$ 로 동일하고, 트랜스포머 자화 인덕터 전류의 DC offset 전류는 0이다.
- 자화 인덕터 L_m 은 스위칭 주파수 f_{sw} 에 비해 직렬 공진 캐패시터 C_r 과의 공진 주파수를 무시할 만큼 크다.

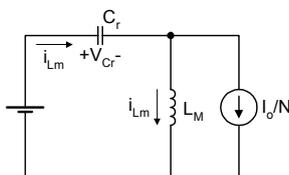


그림 6 $t_0 \sim t_1$ 구간에서의 등가회로

그림 6은 $t_0 \sim t_1$ 구간에서의 등가 회로를 보이고 있으며 이는 스위칭 반주기 동안 지속된다. 그림과 같은 공진회로에서 캐패시터 C_r 과 자화 인덕터 L_m 의 전압 $V_{cr}(t)$ 및 전류 $i_{Lm}(t)$ 를 미분방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$C \frac{dV_{cr}(t)}{dt} = i_{Lm}(t) + \frac{I_o}{N} \quad (1)$$

$$V_{in} = V_{cr} + L_m \frac{di_{Lm}(t)}{dt}$$

이때 캐패시터 C_r 과 자화 인덕터 L_m 의 초기치는 다음과 같다.

$$V_{cr}(t_0) = -V_v, \quad i_{Lm}(t_0) = -I_v \quad (2)$$

위의 미분방정식의 해를 구해보면 다음과 같이 캐패시터 C_r 과 자화 인덕터 L_m 의 전압 $V_{cr}(t)$ 및 전류 $i_{Lm}(t)$ 의 수식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$V_{cr}(t) = Z \left(I_v - \frac{I_o}{N} \right) \sin(\omega t) - (V_v + V_{in}) \cos(\omega t) + V_{in}$$

$$i_{Lm}(t) = - \left(I_v - \frac{I_o}{N} \right) \cos(\omega t) + \frac{(V_v + V_{in})}{Z} \sin(\omega t) - \frac{I_o}{N}$$

위의 식으로부터 V_v 와 I_v 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_v = Z \frac{I_o}{N} \frac{\sin(0.5\omega/f_{sw})}{1 + \cos(0.5\omega/f_{sw})} \quad (4)$$

$$I_v = \frac{V_{in}}{Z} \frac{\sin(0.5\omega/f_{sw})}{1 + \cos(0.5\omega/f_{sw})}$$

한편, 출력 전압은 정류된 트랜스포머 2차측 전압의 평균과 같음을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_o = \frac{1}{T_s/2} \int_0^{T_s/2} \frac{1}{N} \{ V_{in} - V_{cr}(t) \} dt$$

$$= \frac{2}{NT_s} \left[\frac{Z}{\omega} \left(I_v - \frac{I_o}{N} \right) \left\{ \cos\left(\omega \frac{T_s}{2}\right) - 1 \right\} - \frac{V_v + V_{in}}{\omega} \sin\left(\omega \frac{T_s}{2}\right) \right]$$

식 (4)에서 구한 V_v 와 I_v 를 식 (5)에 대입하면 주파수에 대한 출력 전압은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_o = \frac{4f_{sw}}{N\omega} \frac{\sin(0.5\omega/f_{sw})}{1 + \cos(0.5\omega/f_{sw})} V_{in} \quad (6)$$

$$\frac{NV_o}{V_{in}} = \frac{2}{\pi f_o/f_{sw}} \frac{\sin(\pi f_o/f_{sw})}{1 + \cos(0.5f_o/f_{sw})}$$

where f_o =resonant frequency of L_m and C_r

그림 7은 f_{sw}/f_o 에 따른 전압 Gain (NV_o/V_{in})을 보이고 있다.

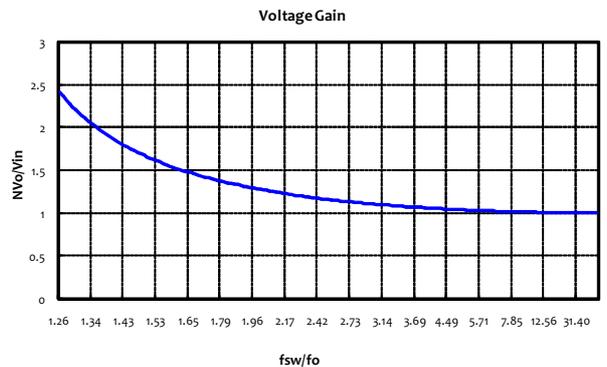


그림 7 제안된 SBC 풀 브리지 컨버터의 주파수에 따른 전압이득

2.3 모의실험

모의실험은 실제 1.2KW급 컴퓨터 서버용 전원장치를 대상으로 하였으며, PSIM을 사용하여 구현하였다.

표 1 설계사양

항목	Value	항목	Value
입력 전압	400 V	자화 인덕턴스	1 mH
출력 전압	12 V	누설 인덕턴스	22 uH
최대 부하전류	100 A	부스트 캐패시터	66 nF
트랜스포머 턴비	35:1:1	출력 인덕터	1.8 uH
		출력 캐패시터	1320 uF

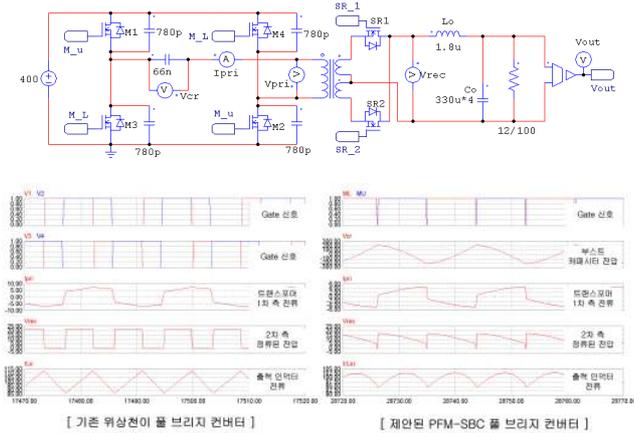


그림 8 모의실험을 위한 PSIM 회로도 및 Simulation 결과파형

위상천이 풀 브리지 컨버터와 제안된 PFM-SBC 컨버터를 동일한 조건의 모의실험을 통하여 비교하였다. 위상천이 풀브리지 컨버터의 경우 약 $0.2T_s$ 의 환류구간이 존재하며, 이로 인해 1차 측 전류의 Peak치가 7.18A로, 제안된 회로가 4.62A를 가짐에 비해 상당히 큰을 알 수 있다. 출력 인덕터 리플 전류 또한 제안된 회로는 8.48A로 기존 위상천이 풀 브리지 컨버터의 25A에 비해 상당히 작은 장점을 확인하였다.

2.4 실험결과

모의실험과 마찬가지로 실제 1.2KW급 서버용 전원장치에 적용하여 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 각부 사양 및 소자 parameter는 위 모의실험의 설계사양과 동일하다. 트랜스포머의 경우 EI3329 core 2개를 사용하였고, 1차 권선과 2차 권선간의 근접효과를 상쇄시키기 위하여 Sandwich 권선법을 적용하였다. 또한 대출력전류 시스템의 고효율화를 위해서 동기정류기를 4개씩 병렬로 사용하였다.

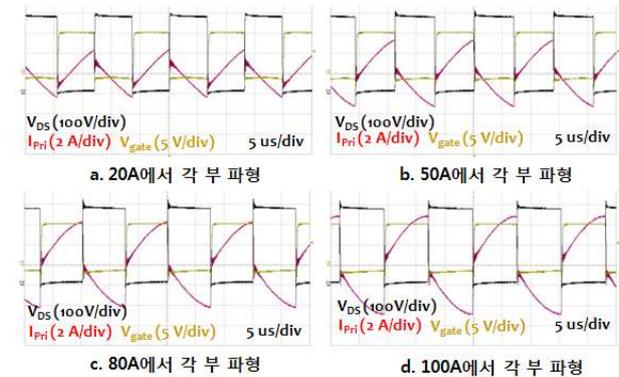


그림 9 부하전류에 따른 각 부 파형

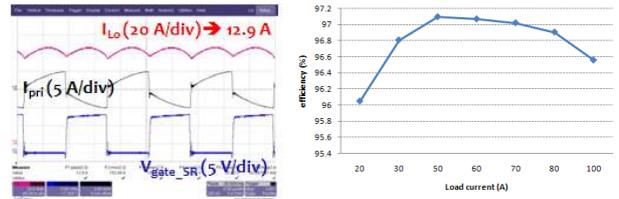


그림 10 최대 부하시 출력 인덕터 전류 리플 및 부하전류에 따른 효율

그림 9는 제안된 PFM-SBC 풀 브리지 컨버터의 부하전류에 따른 각 부 실험파형을 나타내고 있다. 부하전류가 20A일 경우 76kHz의 스위칭 주파수로 동작하였으며, 부하전류가 100A로 증가하였을 경우 스위칭 주파수가 64kHz까지 감소하여 출력전압을 Regulation하였다. 부하전류가 100A일 경우 1차 측 전류의 Peak는 4.8A이며, RMS치는 3.557A로 모의실험과 유사함을 확인하였다.

그림 10은 최대부하시의 출력 전류 리플 및 부하전류에 따른 효율 측정치를 나타낸다. 1.8uH의 출력 인덕터를 사용하였을 경우, 최대 부하시 출력전류리플이 12.9A로 측정되어 소자 전류스트레스가 줄어들음을 확인하였으며, 효율 측정 결과 20% 이상의 부하조건에서 96%가 넘는 고효율을 획득할 수 있었다. 특히 최대 부하시(100A)에도 96.55%의 고효율로 대용량에 매우 적합함을 확인하였다.

3. 결론

본 논문에서는 대용량 DC/DC 컨버터의 고효율화를 위한 새로운 PFM-SBC 풀브리지 컨버터를 제안하였다. 제안된 회로는 50%고정 시비율로 구동하며, 스위칭 주파수를 조절하여 출력전압을 제어하는 것이 특징이다. 따라서 환류구간이 존재하지 않아 효율 및 발열특성이 우수하고 출력 인덕터 전류 리플 또한 매우 작다. 실제 1.2KW급 컴퓨터 서버용 전원장치를 대상으로 PSIM simulation 및 실제실험을 수행하였으며, 최종적으로 100A 부하조건에서의 96.55%의 고효율을 보임으로써 제안된 회로가 대용량에 매우 적합함을 확인하였다.

이 논문은 삼성전기(주)의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

- [1] Richard Redl, "A Novel Soft-Switching Full-Bridge DC/DC Converter: Analysis, Design Considerations, and Experimental Results at 1.5 kW, 100kHz", Proceedings of the IEEE, Vol.6, Issue 3, pp. 408-418, 1991, July
- [2] Robert Weger, "Resonant Converter with Current Controlled Inductances", Proceedings of the IEEE, Vol.2, Digital Object Identifier 10. pp. 1184-1189, 2003, Dec.
- [3] Chris Calwell, "AC-DC Server Power Supplies: Making the Leap to Higher Efficiency", Proceedings of the IEEE, Vol.1, pp.155-158, APEC 2005, March