

에너지 회생 스너버를 적용한 고효율, 고역률 AC/DC Boost 컨버터에 관한 연구

유종규*, 김 용*, 배진용*, 백수현**, 최근수**, 계상범***

*동국대학교, **(주)디지아이, **(주)메디슨

A Study on the High-Efficiency, High-Power-Factor AC/DC Boost Converter Using Energy Recovery

chong-gyu Ryu*, yong Kim*, Jin-Yong Bae*, Soo-Hyun Baek*, Geun-Soo Choi**, Sang-bum Gye***

*Dongguk University, **D.G.I., ***Medison

Abstract - A passive lossless turn-on/turn-off snubber network is proposed for the boost PWM converter. Previous AC/DC PFC Boost Converter perceives feed forward signal of output for average current-mode control. Previous Boost Converter, the quantity of input current will be decreased by the decrease of output current in light load, and also power factor comes to be decreased. Also the efficiency of converter will be decreased by the decrease of power factor. The proposed converter presents the good PFC, low line current harmonic distortions and tight output voltage regulations using energy recovery circuit. All of the semiconductor devices in the converter are turned on under exact or near zero voltage switching(ZVS). No additional voltage and current stresses on the main switch and main diode occur. To show the superiority of this converter is verified through the experiment with a 640W, 100kHz prototype converter

1. 서 론

일반적으로 스위칭 전원 공급 장치의 입력부는 브리지 다이오드와 필터 커패시터로 구성되어 입력 AC전압을 DC전압으로 변환한다.[1] 이러한 경우 입력 커패시터의 영향으로 입력 전류 파형이 정현파가 아닌 첨예한 펄스 형태로 되어 역률이 0.5~0.65 정도로 낮아지게 된다. 그 결과, 입력 전류의 고조파 성분이 증가하여, 많은 노이즈와 EMI가 발생되고, AC 선간 전압 파형이 왜곡되어 상용 전원에 연결된 다른 전자 기기들에 나쁜 영향을 미치게 된다.[1-2]

이러한 문제점을 해결하기 위해 AC/DC PFC Boost 컨버터를 제시하였으나 경부하시 역률 저하와 하드스위칭으로 인한 스위칭 손실 및 다이오드의 역회복 손실로 효율이 낮아지는 문제점을 지니게 되었다. 그 결과 본 논문에서는 에너지 회생 스너버 회로를 이용한 AC/DC PFC Boost 컨버터를 제안한다. [1-5]

제안된 컨버터에서는 보조 다이오드(D_{a1}, D_{a2}, D_{a3}), 결합 인덕터(L_{in2}) 그리고 하나의 스너버 커패시터(C_s)로 구성된 전력 전달 경로를 추가하여 역률이 거의 1에 근사하며, 실효 전류의 증가로 경부하시 우수한 효율을 나타낼 수 있다. 또한, 스위치의 턴온(Turn-on), 턴오프(Turn-off)과정에서도 스위칭 손실 및 다이오드의 역회복 손실 문제를 해결하였다. 제안된 컨버터의 특성은 MOSFET를 사용하여 640W급 시작품을 제작, 100kHz에서 실험을 통해 입증하였다.

2. 본 론

2.1 첨단왜곡(Cusp Distortion) 현상

그림 1은 첨단왜곡 현상을 나타낸다.[1]

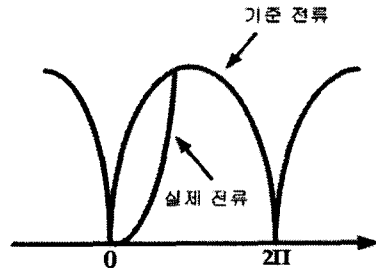


그림 1. 첨단왜곡(Cusp Distortion) 현상

첨단왜곡 현상이란 입력 전압이 0V를 교차할 때 나타나며, 승압 인덕터의 인덕턴스 값이 큰 경우 또는 경부하시 실제 전류가 기준 전류를 추종하지 못하는 현상을 의미한다. 이 현상은 역률이 낮아지는 문제점을 발생시킨다.

첨단왜곡이 발생하는 동안 승압 인덕터에 흐르는 전류는 식 (1)과 같다.

$$i_{Lm}(t) = \frac{\omega L}{X} [1 - \cos(\omega t)] \quad (1)$$

2.2 평균전류모드방식

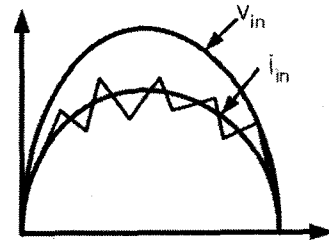


그림 2. 평균전류모드 제어 방식

본 논문에서는 입력 전류 리플의 평균값이 입력 전압에 비례하도록 제어하는 평균전류모드 방식을 사용하였다.

평균전류모드 방식의 특징은 다음과 같다.[1]

- 1) 낮은 전류 스트레스
- 2) 낮은 실효치 전류
- 3) 작은 EMI 필터

2.3 제안된 AC/DC PFC Boost 컨버터

그림 3은 기존의 AC/DC PFC Boost 컨버터 회로를 나타내며 그림 4는 본 논문에서 제안하는 회로 구성으로 기존의 컨버터에 3개의 보조 다이오드, 1개의 결합 인덕터, 1개의 스너버 커패시터로 구성되는 에너지 회생 스너버를 적용하여 주 스위치가 안정적인 영전압 스위칭(ZVS) 동작을 하도록 한다.

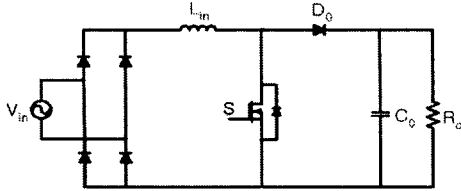


그림 3. 기존의 AC/DC PFC Boost 컨버터 회로

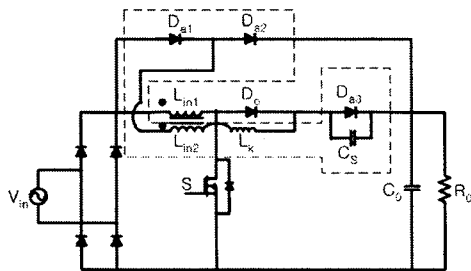


그림 4. 제안된 AC/DC PFC Boost 컨버터 회로

또한, 에너지 회생 스너버 회로는 출력측으로 전력을 전달할 수 있는 추가적인 경로를 형성함으로써 경부하시 첨단왜곡 현상을 방지하는 공진 탱크 역할을 한다.

2.4 이론적인 파형 및 동작 특성

그림 4,5는 에너지 회생 스너버를 적용한 AC/DC PFC Boost 컨버터의 모드별 동작 회로 및 이론적인 각 부 파형을 나타낸다.

모드별 정상상태 해석을 위해 다음과 같이 가정한다.

- 1) 모든 소자는 이상적이다.
- 2) 스위치 및 다이오드에 흐르는 전류 리플은 무시한다.
- 3) 스위치 양단의 전압 리플은 무시한다.
- 4) 출력측 평활용 커패시터는 충분히 크다고 가정한다.

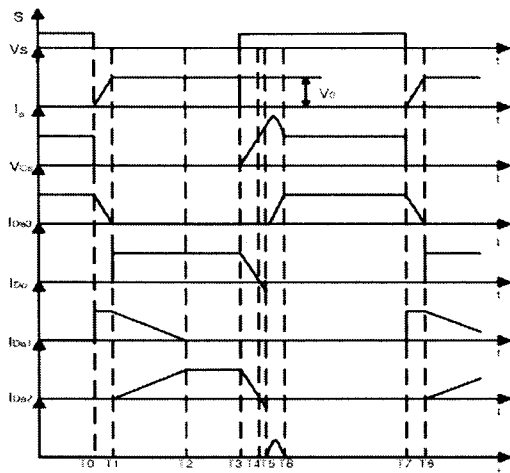


그림 4. 이론적인 회로의 각부 파형

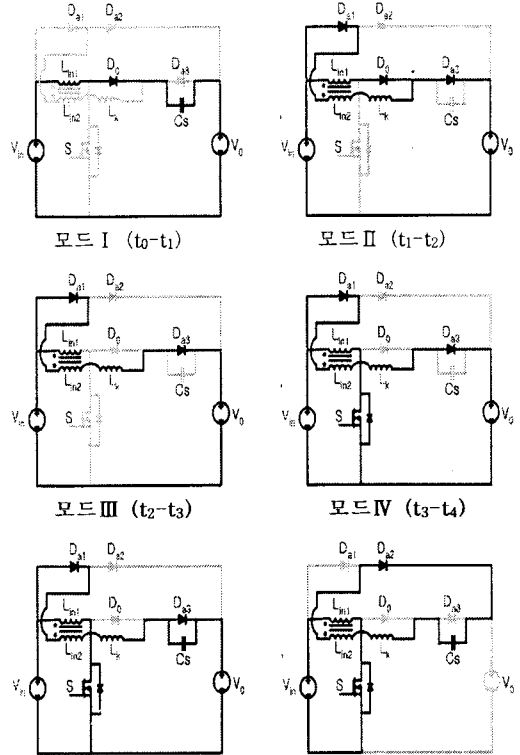


그림 5. 모드별 동작 회로

1) 모드 I (\$t_0-t_1\$)

주 스위치(S)가 턴-오프되는 모드로서 입력 전압과 1차측 결합 인덕터(\$L_{N1}\$) 전압은 중첩되며, 스너버 커패시터(\$C_s\$)에 저장된 에너지는 출력측으로 방전된다.

$$\frac{dV_s}{dt} = \frac{I_{Lm}}{C_s} \quad (2)$$

2) 모드 II (\$t_1-t_2\$)

모드 II에서 스너버 커패시터(\$C_s\$)가 모두 방전하고, 결합 인덕터 1차측 에너지가 2차측으로 전달되며, 출력 다이오드(\$D_o\$)에서 보조 다이오드(\$D_{a1}\$)로 전류 경로가 서서히 이동하기 시작한다. 이때 누설 인덕터(\$L_k\$)에 흐르는 전류는 식(3)과 같다.

$$\frac{di_{Lk}}{dt} = \frac{(n-1)(V_0 - V_{in})}{L_k} \quad (3)$$

3) 모드 III (\$t_2-t_3\$)

모드 III는 주 다이오드에 흐르는 전류가 차단되고, 동시에 누설인덕터(\$L_k\$)의 전압은 0이 된다. 이 때 보조 다이오드(\$D_{a1}, D_{a3}\$), 누설 인덕터(\$L_k\$)을 통하여 에너지가 출력측으로 전달된다.

$$i_{Lk} = \frac{I_{Lm}}{n} \quad (4)$$

4) 모드 IV (\$t_3-t_4\$)

주 스위치(S)가 영전압 스위칭(ZVS) 조건에서 턴온되는 모드로서 결합 인덕터 1차측의 전압은 입력 전압(\$V_{in}\$)으로 인가되고 2차측 전압은 입력 전압(\$V_{in}\$)의 \$n\$배로 된다. 이 기간동안 결합 인덕터의 1차측에 흐르는 전

류(I_{Lp})는 누설 전류(i_{Lk})가 1/n배로 감소하는 만큼 증가하게 된다.

$$\frac{di_{Lk}}{dt} = \frac{V_0 + (n-1)V_{in}}{L_k} \quad (n > 1) \quad (5)$$

5) 모드 V (t_4-t_5)

모드 V에서는 다이오드의 역회복 특성 때문에 보조 다이오드(D_{a1}, D_{a2})로 전류가 흐른다. 이때 누설 인덕터(L_k)는 역으로 흐르는 전류 피크를 제한한다. 따라서 하드스위칭(hard-switching)에 비해 전류 스트레스를 현저히 저감하게 된다.

$$I_{Dc(pk)} = \frac{n V_{in}}{Z} = \frac{n V_{in}}{\sqrt{L_k/C_s}} \quad (6)$$

6) 모드 VI (t_5-t_6)

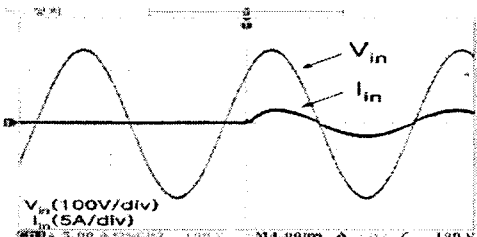
보조 다이오드(D_{a1})은 ($V_0 - V_{in}$)으로 차단되고, 전류는 보조 다이오드(D_{a2}), 스너버 커패시터를 통해 흐른다. 이 모드는 스너버 커패시터(C_s)가 충전이 완료될 때까지 지속된다.

2.5. 실험결과

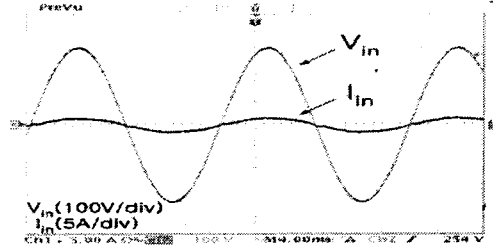
제한된 방식의 타당성을 검증하기 위해 100kHz, 640W AC/DC PFC Boost 컨버터를 제작하여 실험하였다. 표 1은 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터 값을 나타낸다.

표 1. 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터

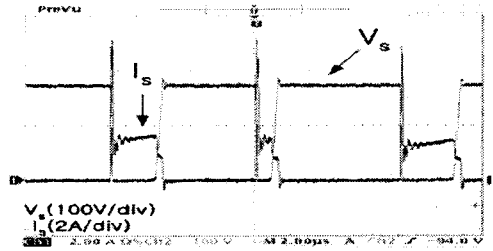
입력 전압 (V_{in})	AC 200V
출력 전압 (V_o)	DC 400V
최대 출력 (P_o)	640W
인덕터 (L_1/L_2)	(900uH / 930uH)
주 스위치 (S)	2SK1522
다이오드 (D)	DSEI 30. IXYS
정류 다이오드	D25XB60. Shindengen
보조 다이오드 ($D_{a1}/D_{a2}/D_{a3}$)	SF20L60U. Shindengen
스너버 커패시터 (C_s)	9nF
출력 커패시터 (C_o)	940uF
스위칭 주파수 (f)	100kHz



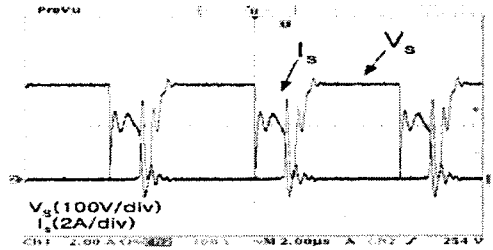
(a) 기존의 PFC 컨버터의 입력 전압 전류 파형



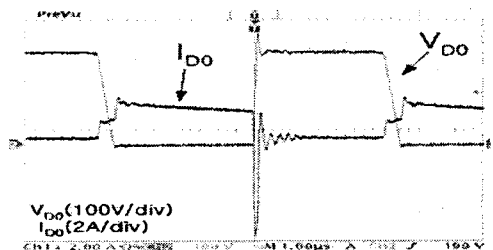
(b) 제한된 PFC 컨버터의 입력 전압 전류 파형
그림 6. 입력 전압 전류 파형 (경부하시)



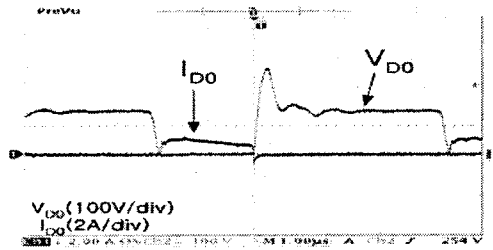
(a) 기존의 PFC 컨버터의 주 스위치 전압 전류 파형



(b) 제한된 PFC 컨버터의 주 스위치 전압 전류 파형 (전부하시)
그림 7. 주 스위치 전압 전류 파형 (전부하시)



(a) 기존의 PFC 컨버터의 주 다이오드 전압 전류 파형



(b) 제한된 PFC 컨버터의 주 다이오드 전압 전류 파형 (전부하시)
그림 8. 주 다이오드 전압 전류 파형 (전부하시)

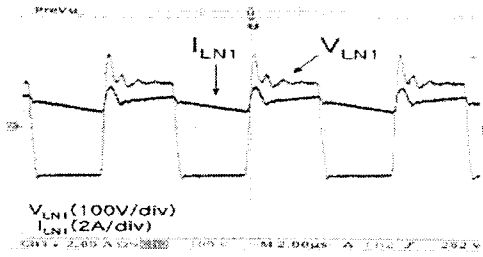


그림 9. 인덕터 전압 전류 확대 파형(전부하시)

그림 6은 경부하(25% 부하)에서 기존의 PFC Boost 컨버터와 제안된 PFC Boost 컨버터의 입력 전압 및 전류 파형을 나타낸다. 경부하시 첨단왜곡 현상에 의해 실효전류가 기준 전류를 추종하지 못하는 현상이 나타나고, 역률 감소에 의해 효율이 낮아지는 문제점이 발생한다. 그러나 제안된 PFC 컨버터는 에너지 회생 스너버 회로에 의해서 이러한 문제점이 해결되어 경부하(25% 부하)시에도 단위 역률로 유지되고, 효율은 약 10% 정도의 향상된 특성을 나타낸다.

그림 7은 주 스위치(S)의 전압 및 전류 파형을 나타낸다. 제안된 컨버터의 주 스위치는 안정적인 영전압 스위칭(ZVS) 동작을 하며, 또한 부분공진 특성으로 인하여 고밀도의 전력을 출력측으로 전달할 수 있다.

그림 8은 주 다이오드(D)의 전압 및 전류 파형을 나타낸다. 스너버 회로에 의해서 주 다이오드의 턴온과 턴오프 손실이 거의 없으므로 전체 시스템의 효율을 향상시킬 수 있다.

그림 9는 승압 인덕터(L_{ini})의 전압 전류 파형을 나타낸다. 스위치의 듀티비가 입력 전압 파형에 의해서 가변되고, 그에 따라 입력 전류 맥동의 평균값이 입력 전압에 비례하도록 제어하는 평균전류모드방식으로 동작됨을 확인할 수 있다.

그림 10, 11은 각각의 방식에 대한 효율과 역률을 비교한 결과를 나타낸다. 본 연구에서 에너지 회생 스너버를 적용한 PFC Boost 컨버터는 기존의 방식에 비하여 전 부하영역에서 우수한 효율 및 역률 특성을 나타냈으며, 특히 경부하시에 우수한 특성을 지니고 있음을 알 수 있다.

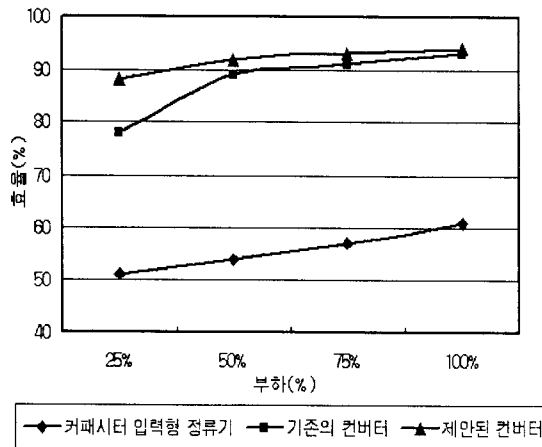


그림 10. 각 방식에 대한 효율 비교

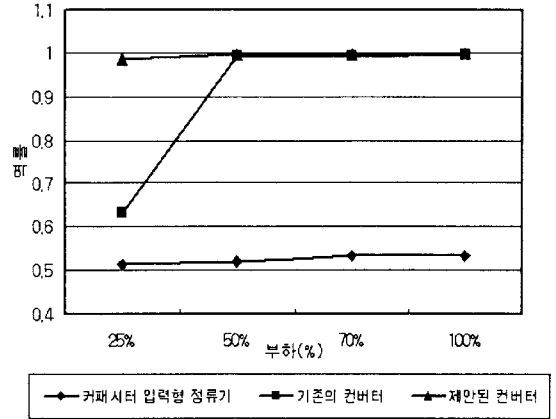


그림 11. 각 방식에 대한 역률 비교

3. 결 론

본 논문에서는 에너지 회생 스너버를 적용한 AC/DC PFC Boost 컨버터에 대하여 논하였다. 제안된 컨버터는 경부하시 발생하는 첨단왜곡(Cusp Distortion) 현상을 제거하여 전 부하 영역에서 단위 역률로 제어되며, 주 스위치와 다이오드의 스트레스를 저감시킴으로서 고효율, 고역률 특성을 보이고 있다. 또한, 연속전류모드 방식이므로 대용량의 AC/DC 전력 변환 장치에 적용 가능하리라 판단된다.

[참고 문헌]

- [1]배진용, 김용, 권순도, 이은영, 강제호, 계상범, "무손실 스너버를 적용한 고역률, 고효율 AC/DC Boost 컨버터에 관한 연구,"대한전기학회 논문지, 51권 11호, pp. 652 - 658, 2002.
- [2]Philip C. Todd, "UC3854 Controlled Power Factor Circuit Design", Unitrode Application Note U-134
- [3]Robert W. Erickson and Dragan Maskimovic, Fundamentals of Power Electronics Second Edition
- [4]C. J. Tseng and C.L. Chen, "A passive lossless snubber cell for nonisolated PWM DC/DC converter," in IEEE Trans, Ind. Ele., Vol.45, No. 4, August,1988, pp.593-601
- [5]Wei Dong, Qun Zhao, Jinjun Liu and Fred C.Lee, "A Boost Converter with Lossless Snubber under Minimum Voltage," in IEEE ,2002