

역률과 전류 리플을 개선한 인터리브 AC/DC 컨버터에 관한 연구

서상화\*, 김 용\*, 권순도\*\*, 배진용\*\*\*, 엄태민§  
 \*동국대학교, \*\*대림대학, \*\*\*특허청, §티엠에스

A Study of Interleaved AC/DC Converter to Improved Power Factor and Current Ripple

Sang-Hwa Seo\*, Yong Kim\*, Soon-Do Kwon\*\*, Jin-Yong Bae\*\*\*, Tae-Min Eom§  
 \*Dongguk University, \*\*Daelim College, \*\*\*KIPO, §TMS

**Abstract** - In high power application, PFC(Power Factor Correction) pre-regulators are generally required. PFC pre-regulators could achieve unity power factor, reduce line input current harmonics and utilize full line power. Interleaving PFC converters could reduce input ripple current, output capacitor ripple current and inductor size. With this closed loop interleaving method, both two phase converters are working at the boundary between continuous and discontinuous mode and accurate 180 degree phase shift is achieved. Implementation of this strategy could be easily integrated to the control chip. Finally, experimental results of a two-phase interleaved boost PFC are presented to verify the discussed features.

1. 서 론

최근 전원공급장치는 더욱 향상된 효율과 역률개선을 요구하고 있으며, AC/DC 전력변환장치는 넓은 입력전압의 변화 AC(85~265[V])에 대응하여 고조파가 저감된 전력을 공급하는 것이 매우 중요하게 언급되고 있다. 이러한 이유는 전기기기의 유럽기준인 EN6100-3-2에 고조파 규제가 중요한 원인이다<sup>[1]</sup>. 전류불연속모드(DCM)의 PFC 승압형 컨버터는 가장 일반적인 역률개선 방식이며 간단한 제어와 높은 효율로 인해 소자수를 줄여주는 이점을 지니고 있다. 또한, 이 기술을 이용하면 넓은 입력전압의 변화에서도 높은 역률을 유지할 수 있다<sup>[2]</sup>.

일반적으로, 고정된 스위칭 주파수와 전류연속모드(CCM) 승압형 컨버터는<sup>[3-4]</sup> 복잡한 제어방식을 취하고 있지만, 수kW급까지 대용량 전력변환장치에 사용되고 있으며 고역률로 동작하는 장점을 지니고 있다. 승압형 컨버터는 인덕터 전류에 따라 전류경계모드(CRM)와 전류불연속모드(DCM)는 일반적으로 중·소용량(수십W~수백W급)에 사용되고 있으며, 전류연속모드(CCM)는 대용량(수백W~수kW급)에 사용되고 있다<sup>[3-4]</sup>.

그러나 주 스위치와 다이오드는 하드 스위칭을 하고, 입력 전류와 출력 전압의 리플이 증가하는 문제점을 내포하고 있다.

본 논문에서는 2개의 위상을 이용한 인터리브 승압형 역률개선 컨버터로써 역률과 전류 리플 개선에 대하여 분석하였다. 이를 통하여 넓은 입력전압 범위에서도 안정적으로 동작하며 고역률 저리플의 AC/DC 컨버터를 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 제안된 인터리브 AC/DC 컨버터

그림1은 제안된 인터리브 AC/DC 승압형 컨버터를 나타낸다.

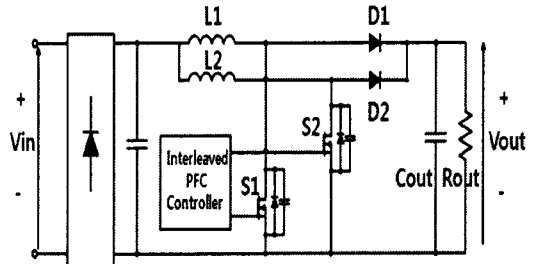


그림1. 인터리브 승압형 AC/DC 컨버터

그림2는 인덕터 전류  $I_{L1}$ ,  $I_{L2}$ 를 통하여 인터리브 입력 전류  $I_L$ 을 나타낸다. 그림2의 제안된 인터리브 병렬 역률개선 컨버터의 게이트 신호는 180도 위상 이동되어 구동되며 이로 인하여 인덕터 전류는 인터리브 된다. 기존 방식에서는 인덕터의 전류 리플은 크지만 제안된 인터리브 승압형 컨버터의 리플 전류는 저감된다. 그러므로 인터리브 기술은 부스트 인덕터와 필터 사이즈를 저감할 수 있다. 식(1)은 입력 리플전류와 듀티비의 변화를 포함한 인덕터 전류 변화를  $k(D)$  비율을 나타낸다.

$$k(D) = \frac{1-2D}{1-D} \quad (D < 0.5) \quad k(D) = \frac{1-2D}{1-D} \quad (D \geq 0.5) \quad (1)$$

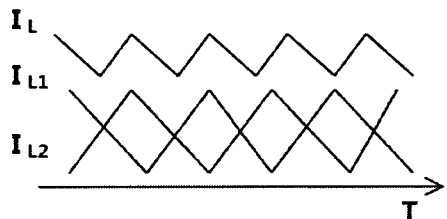


그림2. 인덕터 전류의 인터리브 파형

2.2 균등 전류분배를 위한 듀티비 이론

병렬로 연결된 컨버터에서 듀티비 분배는 기준 전류  $i_{Lref}/n$  (n: 병렬로 연결된 승압형 컨버터의 수)과 실제 인덕터 전류  $i_j$  (j=1,2,... n) 사이의 차이  $\Delta i_j$ 를 기초로 한다. 균등 전류분배 듀티비 원리는 식(2)와 같이 정의할 수 있다.

$$\Delta d_j = -\frac{\Delta i_j}{i_{Lref}} d_{dm} \quad (2)$$

$\Delta i_j$ 에서 각 병렬 컨버터의 균일한 전류 분배는 기준 전류로부터 전류 분배의 위상이 기본이 되고  $d_{dm}$ 은 이때 할당된다.

실제 병렬 부스트 PFC 제어 시스템에서  $d_{\min}$ 은 필수적으로 결정되며, 일반적으로 승압형 PFC 컨버터가 정상상태에 도달할 때 입력 전압과 연관되고 듀티 사이클 제어는 그림3과 같다.

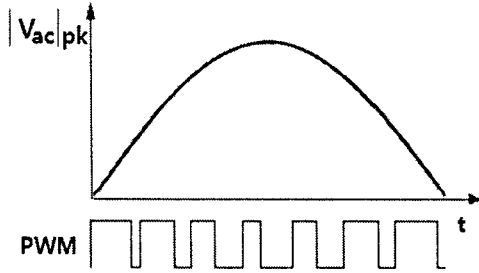


그림3. 입력 전압과 듀티비 제어의 관계

그림3은 입력 전압과 듀티비 제어의 관계를 나타낸다. 입력 전압이 0에 가까워질 때, 듀티비의 온(on) 시간은 최대로 동작한다. 이 시간에서 병렬로 연결된 컨버터의 제어기는 듀티비의 변화폭이 적어지며 이로 인하여 컨버터의 전체 안정도가 저감되는 문제점을 지니고 있다. 입력 전압이 최대값 근처에 있는 동안 듀티비 변화는 작다. 또한 이 시간의 듀티비는 식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$d_{\min} = \frac{V_{\text{out}} - |V_{\text{ac}}|_{\text{pk}}}{V_{\text{out}}} \quad (3)$$

식(3)에서 컨버터의 제어기는 최대로 균형적인 전류를 공급하고 있고, 식(4)와 같이 듀티비가 정의된다.

$$d_{\text{dm}} = 1 - d_{\min} \quad (4)$$

식(1)로부터 전체 제어 듀티비는 식(5)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_{j=1}^n d_j = \frac{\sum_{j=1}^n \Delta i_{Lj}}{I_{\text{Lref}}} d_{\text{dm}} + nd_{\text{av}} \quad (5)$$

$d_j$ 는 각 병렬 컨버터의 듀티비를 제어하고  $d_{\text{av}}$ 는 평균 전류 제어기의 듀티비를 제어한다. 평균전류 제어기가 좋을 때  $\left[ i_{\text{Lref}} - \sum_{j=1}^n i_{Lj} \right]$ 는 0으로 수렴한다. 따라서 평균 전류 제어기의 전체 제어 출력은  $nd_{\text{av}}$ 임을 알 수 있다.

따라서 식(4)로부터, 제시된 전류분배 듀티비 분배 원리를 제안된 인터리브 승압형 컨버터에 적용할 수 있다.

### 2.3 인터리브 역률개선 승압형 컨버터의 장점

그림4는 입력 전압과 듀티비 제어의 관계를 나타낸다. 인터리브 역률개선 컨버터는 출력리플을 저감시키는 장점이 있으며, 이것은 인터리브 승압형 컨버터에서 출력 커패시터 리플 전류는 일반적인 승압형 컨버터 보다 절반으로 줄어든다. 이러한 리플 전류의 감소는 커패시터의 등가직렬저항(ESR) 손실을 줄여주며, 출력 커패시터의 크기를 저감하는 장점이 있다.

### 2.4 인터리브 역률개선 승압형 컨버터의 단점

2.3절과 같이 인터리브 승압형 컨버터는 등가직렬저항(ESR) 손실을 줄여주며, 출력 커패시터의 크기를 저감하는 장점을 가지고 있지만 컨버터의 제어회로가 복잡해지는 단점이 있다. 이로 인하여 전력 제어의 구성 요소들, 예를 들면 제어 집적회로(IC), 동위상 회로, 피드백 제어와 2위상 사이의 전류 균형 등의 어려움이 항상 존재하는 단점이 있다.

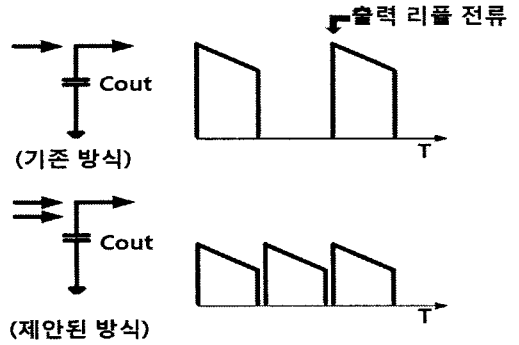


그림4. 입력 전압과 듀티 사이클 제어의 관계

### 2.5 실험결과

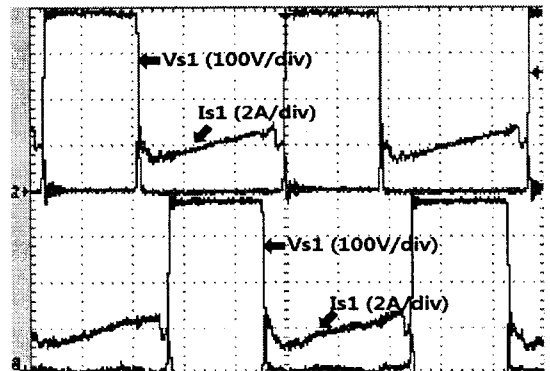
제안된 인터리브 AC/DC 역률개선 승압형 컨버터의 특성 파악을 위하여 입력 AC 90~250V, 출력 DC 400V/0.8A, 스위칭 주파수 200kHz, 출력 300W급을 제작하여 실험하였다. 표 1은 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터 값을 나타낸다.

표1. 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터

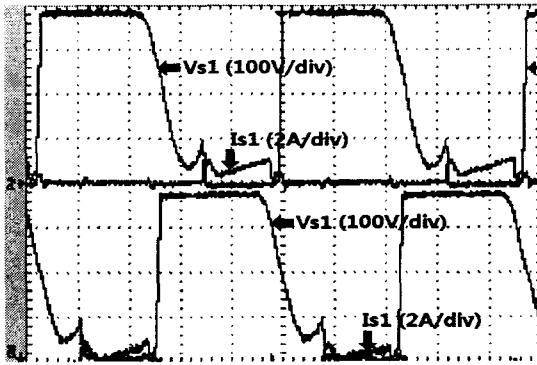
입력전압 ( $V_{in}$ )	AC 90~250 V
출력전압 ( $V_o$ )	DC 400 V
최대출력 ( $P_o$ )	300 W
스위칭 주파수 ( $f$ )	200 kHz
승압 인덕터 ( $L_1$ )	289 $\mu$ H. CSC
승압 인덕터 ( $L_2$ )	296 $\mu$ H. CSC
브리지 정류 다이오드	KBU600. QUATRO
쇼트키 다이오드 ( $D_1, D_2$ )	CSD10060. CREE
전류 변압기( $CT_1, CT_2$ )	PQ2625. TDK $\times$ 2 $N_1 : N_2 = 50 : 1$
출력 커패시터 ( $C_{out}$ )	100 $\mu$ F $\times$ 2
주 스위치 ( $S_1, S_2$ )	IRFP 460. IXYS
PFC 제어기	UCC28070. TI

그림5는 스위치  $S_1, S_2$ 의 전압 및 전류 파형으로 전류 불연속모드(DCM)와 전류연속모드(CCM)의 경계에서 동작하는 것을 알 수 있고, 또한 220[V]보다 110[V]에서 턴·오프(turn-off) 손실이 많음을 알 수 있다.

그림6은 그림5에서의 두 스위치가 교대로 동작하는 것을 기점으로 인덕터 전류가 인터리브 되는 것을 확인할 수 있다.



(a) 110V (1us)



(b) 220V (1us)

그림5. 스위치 S1, S2의 전압, 전류 파형

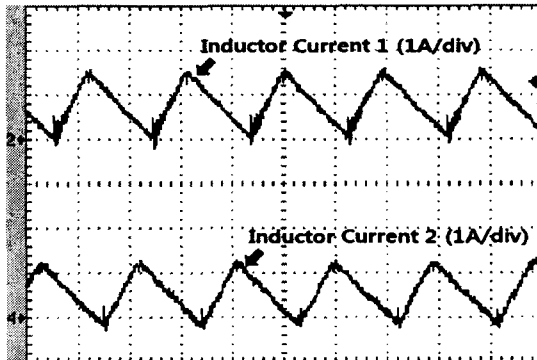
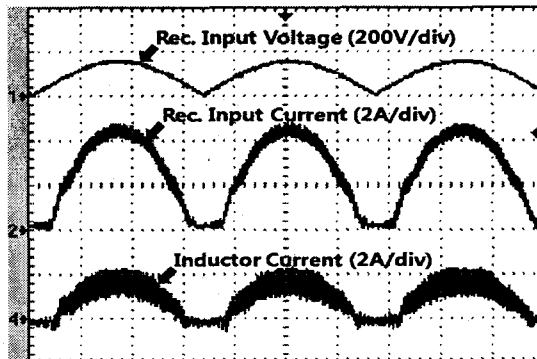
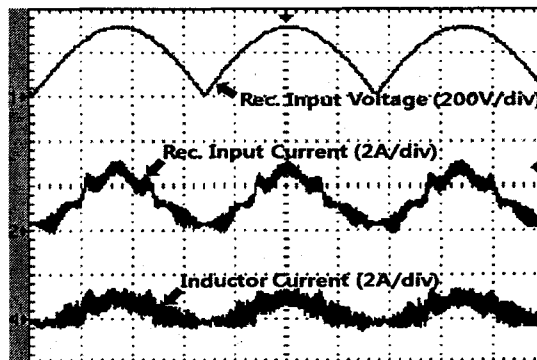


그림6. 인덕터 전류 파형 (2.5us)

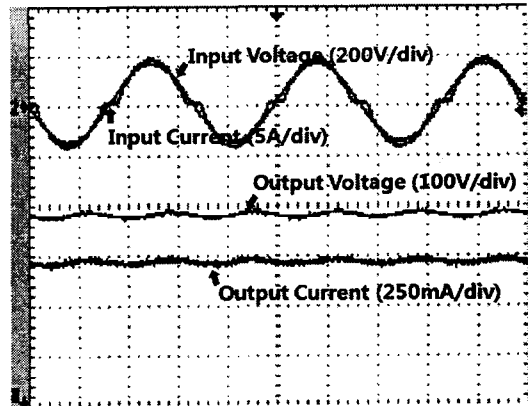


(a) 110 V (2.5ms)

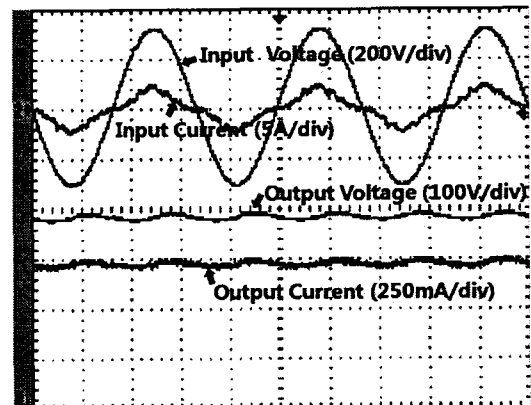


(b) 220V (2.5ms)

그림7. 정류 전압, 전류 및 인덕터 전류 파형



(a) 110V (5ms)

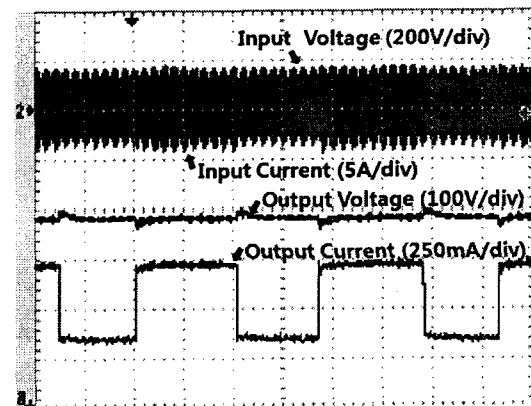


(b) 220V (5ms)

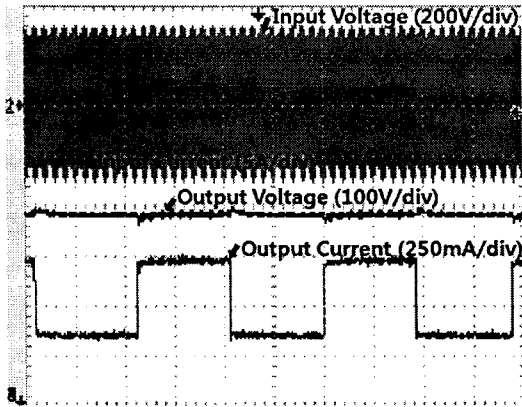
그림8. 입력 전압, 전류 출력 전압 전류 파형

그림7은 정류된 입력 전압 및 전류 파형을 나타내며, 110V에서는 단위 역률과 같게 나타나지만, 220V에서는 높은 주파수 리플과 왜곡이 다수 있음을 알 수 있다. 또한 그림8은 입력 전압, 전류 및 출력 전압, 전류 곡선으로 100% 부하시 나타내었다.

그림9는 부하를 100% → 50% 교대로 변동시켜 그에 따른 입력 및 출력의 전압, 전류 파형을 나타내며 부하 변동 시 출력 전압이 일정하게 유지 되는 것을 확인하였다.



(b) 110V (500ms)



(b) 110V (500ms)

그림9. 부하 변동에 따른 전압, 전류 파형

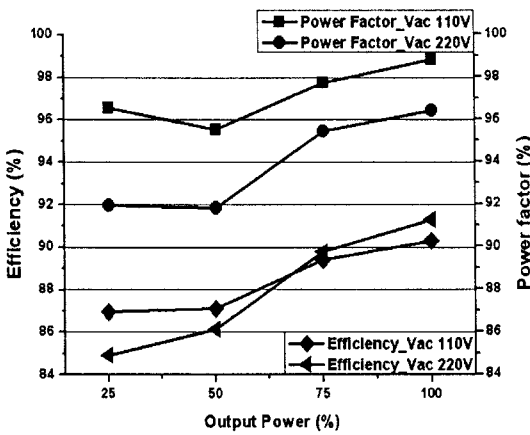


그림10. 출력 전력에 따른 효율 및 역률 특성

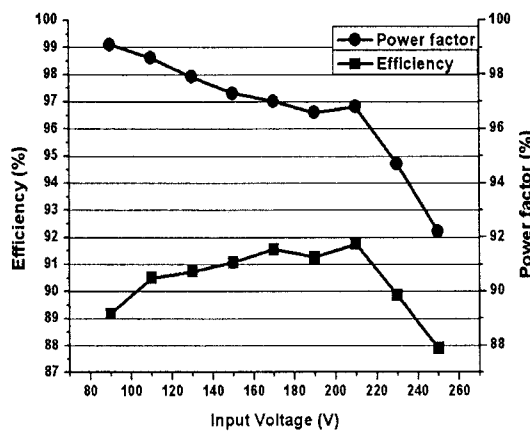


그림11. 입력 전압에 따른 효율 및 역률 특성

그림10, 11에서는 제안된 인터리브 승압형 컨버터의 출력 전력 및 입력 전압에 따른 역률과 효율을 각각 비교한 결과로 측정은 Voltech사 전력 분석계 PM3000A를 사용하여 입·출력 전압 및 전류를 실측하여 계산한 결과이다. 그림10은 100[%] 부하시 220[V]일 때 역률은 0.988이고 효율은 90.299[%]를 나타냈으며 25[%] 부하시

220[V]일 때 역률은 0.919, 효율은 84.921[%]를 나타내었다. 또한, 그림11에서는 입력 전압 90~250V를 20V단위로 나누어 측정한 결과 역률은 89[%]에서 92[%]사이로 동작함을 확인하였다.

### 3. 결론

본 논문에서는 역률과 전류 리플을 개선한 인터리브 AC/DC 컨버터에 대하여 분석하였다. 제안된 컨버터는 역률 개선을 위한 연속 전류모드 방식인 평균전류모드 방식으로 제어하며, 2개의 인덕터가 교대로 제어되는 인터리브 방식을 적용하였기 때문에 출력 전류리플을 저감시켰다. 동시에 80도 위상 이동을 간단한 제어기를 이용하여 입력 AC 90~250V와 전부하 범위에서 단위 역률로 제어됨을 확인하였다. 제안된 인터리브 승압형 컨버터는 승압 인덕터를 연속전류모드 방식으로 동작시킴으로 대용량 AC/DC 전력 변환 장치에 적용하는 경우 매우 효과적일 것으로 판단된다.

### [참고 문헌]

- [1] International Electrotechnical Commission, "IEC 61000-3-2: Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 3 Limits - Section 2 Limits for Harmonic Current Emissions," 2000.
- [2] X. Huang, X. wang, F. J. Nergaard, T. J. Lai, X. Xu, L. Zhu, "Parasitic ringing and design issues of high power interleaved boost converters," The proceedings of IEEE PESC '02, pp. 30~35, 2002.
- [3] 배진용, 김용, 권순도, 이은영, 강재호, 계삼범, "무손실 스위치버를 적용한 고효율 고훈율 AC/DC Boost 컨버터에 관한 연구," 대한전기학회 논문지, Vol 51B, No. 11, pp. 652~657, 2002.11.
- [4] Philip C. Todd, "UC3854 Controlled Power Factor Correction Circuit Design," Unitorde Application Note U-134, Texas Instruments, 1999.
- [5] Jong C. Wang, and Hon-Ji. Chen, "Design and Analysis of AC/DC Converters with Interleaved Power Factor Correction," The proceedings of WCICA '08, pp. 9385~9387, 2008.
- [6] J. Zhihong, L. Hui, and H. Lipei, "Parallel-connected Interleaving CCM PFC Converter Based on Duty-Cycle Dynamic Distribution Controller," The proceedings of APEC '09, pp. 780~785, 2008.
- [7] Texas Instruments UCC28070 Datasheet, 2008.