

# 단일단 역률개선 회로를 이용한 인터리빙 (interleaving) 방식 AC/DC 컨버터

김응호, 권봉환  
포항공과대학교

## An interleaved single-stage power-factor-correction AC/DC converter

Eung-Ho Kim, Bong-Hwan Kwon  
Pohang university of science and technology

### ABSTRACT

An interleaved single-stage power-factor-correction (PFC) AC/DC converter is presented in this paper. The proposed converter is combined by two single-stage AC/DC converters based on flyback converter. Each PFC stage operates in discontinuous conduction mode (DCM). By exploiting the interleaving technique, the input ripple current and output ripple voltage are reduced. The proposed converter complied with EN/IEC61000-3-2 harmonic regulations achieves high efficiency and low cost. The performance of the proposed converter was evaluated on a 180W (90W×2, 24V, 7.5A) experimental prototype.

### 1. 서론

고효율, 소형화된 저가의 단일단 역률개선 AC/DC 컨버터가 오랜 기간 연구되어 왔다. 이러한 단일단 역률개선 회로는 입력전류모양개선, 절연, 그리고 정확한 출력전압 정류를 단일단에서 수행한다. 대부분의 제안된 단일단 역률개선회로는 boost형 역률개선회로와 PWM DC/DC 컨버터단을 통합한 형태이다.<sup>[2]</sup>

인터리빙 방식의 컨버터는 병렬로 연결된 DC/DC 컨버터를 변형한 형태이며 동일한 주파수를 가지는 DC/DC 컨버터단의 스위칭 순간이 한주기 이내에서 위상 이동 (phase-shift)된다.<sup>[6]</sup> 인터리빙 방식의 장점은 스위칭 손실을 증가 시키지 않고, 스위칭 주파수를 올린 것과 비슷한 효과를 거둘 수 있다는 데 있다.

본 논문에서는 인터리빙 방식으로 구성된 단일단 역률개선회로를 제안하고 분석한다. 또한, 실험 결과 및 파형을 통해 단일단 역률 개선 회로를 인

터리빙 방식으로 구성하였을 경우 입력전류와 출력전압 리플이 감소함을 보이고자 한다.

### 2. 회로 구성

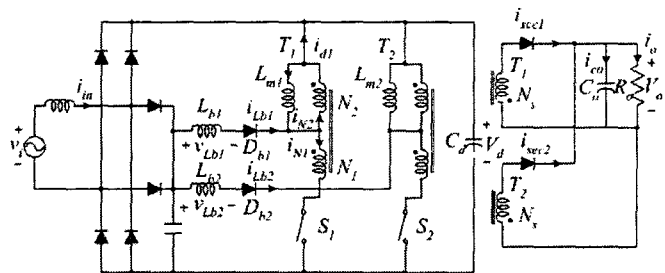


그림 1 인터리빙 방식의 단일단 역률개선회로  
Fig. 1 An interleaved single-stage PFC AC/DC converter

그림 1은 본 논문에서 제안하는 인터리빙 방식의 역률개선회로로 DC/DC 단은 flyback 컨버터이다. 트랜스포머의 전기적 모델 (electric model)은 그림 1에서와 같이 자화 인덕턴스  $L_m$ 과 턴비 (turn ratio)만을 고려한다. 트랜스포머의 권선기법 (winding method)은 센터-탭 (center-tap) 형식으로 권선들을 커플링 하였다. 역률개선회로는 하나의 인덕터와 하나의 다이오드가 직렬로 연결된 형태로 DC/DC 컨버터단과 스위치를 공유하는 구조이다. 트랜스포머와 boost 인덕터 및 다이오드를 병렬로 연결하고, 스위치 (mosfet) S1 과 S2의 게이트 (gate-source) 전압은 180도 위상차를 두도록 하여 두 boost 인덕터 ( $L_{b1}$ ,  $L_{b2}$ ) 및 트랜스포머 ( $T_1$ ,  $T_2$ )가 인터리빙 방식으로 동작하도록 한다.

### 3. 회로 해석

회로 해석을 단순화 하기위해 다음과 같은 가정을 한다. 별도의 제어회로 없이 역률개선이 되게

하기위해서 boost 인덕터는 DCM (discontinuous conduction mode) 영역에서 동작하고 트랜스포머는 CCM (continuous conduction mode) 영역에서 동작한다고 가정한다. 스위칭 주파수는 라인 주파수보다 매우 크므로 한 스위칭 주기 내에서 입력전압  $v_i$ 는 일정하고 충분히 큰 용량의 dclink 콘덴서를 사용하여 dclink 전압  $V_d$ 는 일정하다고 가정한다. 또한, 입력전압의 첨두치 근처에서 입력전류는 브릿지 다이오드에서 dclink 콘덴서로 직접 흐를 수 있는데 dclink 커패시터 전압  $V_d$ 는 입력전압의 최대치 보다 커서 브릿지 다이오드에서 dclink 콘덴서로 직접 흐르는 전류는 없다고 가정한다. 입력전압  $v_i$ 의 크기에 따라 다음과 같이 2가지 모드로 나누어 해석 가능하다.

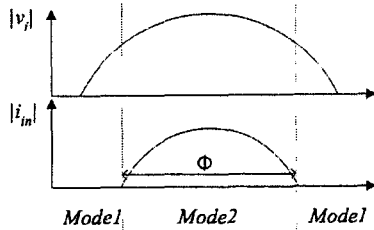


그림 2 동작 모드  
Fig. 2 Operation modes

Mode 1 : 이 모드는 다음 식과 같이 라인 입력전압이 낮은  $|v_i| < \frac{N_1}{N_1+N_2} V_d$  경우로, boost 다이오드  $D_{b1}$ 과  $D_{b2}$ 는 역바이어스 (reverse biased)되어 라인 입력 전류는 흐르지 않게 된다. 그러나 출력 전압은 입력전압에 관계없이 인터리빙된다. 기본동작은 일반적인 flyback 방식을 인터리빙시킨 것과 같고 회로 해석은 생략한다.

Mode 2 : 이 모드는 다음 식과 같이 라인 전압이 높을 때이다.  $|v_i| > \frac{N_1}{N_1+N_2} V_d$

그림 3은 두 주기 동안의 이론 파형을 나타낸다. 아래의 해석은 boost 인덕터  $L_{b1}$ 을 기준으로 시간을  $t_0, t_1, t_2, t_3$ 로 나누었으며  $L_{b2}$ 는  $L_{b1}$ 과 비교했을 때 180도 위상차가 있는 전압과 전류 파형을 가진다.

I)  $[t_0 - t_1]$   $t_0$ 에서 스위치  $S_1$ 은 도통되고 자화 인덕턴스  $L_{m1}$ 은 CCM 영역에서 동작하며 양단에  $V_d$ 가 걸리므로  $L_{m1}$ 에 흐르는 전류는 선형적으로 증가한다.

$$i_{Lm1} = \frac{V_d}{L_{m1}}(t-t_0) + I_{Lm1}(t_0) \quad (1)$$

boost 다이오드  $D_{b1}$ 은 순방향 바이어스 되며 boost 인덕터에 걸리는 전류는 DCM으로 동작하므로 흐르는 전류는 영 (zero)에서 선형적으로 증가한다.

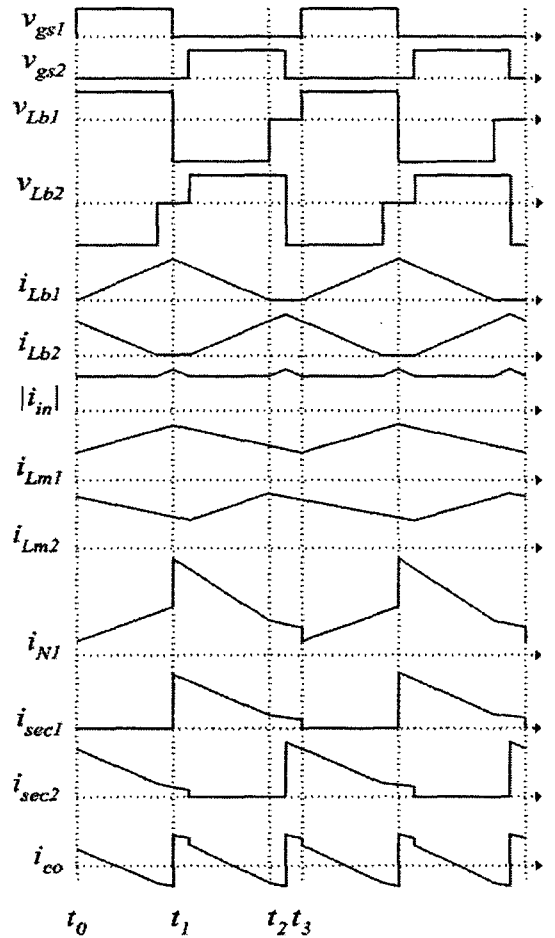


그림 3 이론 파형  
Fig. 3 Key waveforms

$$i_{Lm2} = \frac{|v_i| - kV_d}{L_{b2}}(t-t_0), \quad k = \frac{N_1}{N_1+N_2} \quad (2)$$

암페어-턴 법칙에서  $N_1$ 과  $N_2$ 에는 턴 수와 반비례하는 전류가 흐르며 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$i_N = \frac{N_2}{N_1} i_{N2}, \quad i_{Lb1} + i_{Lm1} = i_M + i_{N2} \quad (3)$$

이차측 정류 다이오드에는 역방향 바이어스가 걸리므로 전류  $i_{sec1}$ 은 영이다. 앞의 식에서 스위치가 도통되어 있는 동안 트랜스포머  $T_1$ 에서 dclink 콘덴서로 흐르는 전류  $i_{d1}$ 은  $N_1$ 에 흐르는 전류와 자화 인덕터에 흐르는 전류의 차이이다.

$$i_{d1} = i_M - i_{Lm1} = \frac{i_{Lb1} - (k_1-1)i_{Lm1}}{k_1}, \quad k_1 = 1 + \frac{N_1}{N_2} \quad (4)$$

위식으로부터 입력전압의 첨두치 부분에서 boost 인덕터에 흐르는 전류에 따라  $i_{d1}$ 은 양과 음의 값 모두를 가질 수 있으며, 자화 인덕터에 저장되는 에너지는 dclink 콘덴서와 라인 입력 전원을 통해서 공급됨을 알 수 있다.

II)  $[t_1 - t_2]$   $t_1$ 에서  $S_1$ 은 차단되고 이차측 정류 다이오드는 순방향으로 바이어스 되며  $L_{m1}$ 에는  $V_d \times N_2 / N_1$ 의 크기의 전압이 걸린다.

$L_{m1}$ 에 흐르는 전류는

$$i_{Lm} = I_{Lm}(t_1) - \frac{k_2 V_o}{L_m}(t-t_1), \quad k_2 = \frac{N_2}{N_s} \text{ 이며,} \quad (5)$$

$L_{b1}$ 에 흐르는 전류는

$$i_{Lb} = I_{Lb}(t_1) - \frac{k_2 V_o + V_d - |v_d|}{L_m}(t-t_1) \text{ 이다.} \quad (6)$$

스위치  $S_1$ 이 차단되어 있으므로 권선  $N_1$ 에는 전류가 흐르지 않으며, 자화 인덕터 전류와 boost 인덕터 전류는 모두 권선  $N_2$ 로 흐른다. 또한 2차 정류 다이오드에

$$\text{흐르는 전류는 } i_{sec1} = \frac{N_2}{N_s}(i_{Lm} + i_{Lb}) \text{ 이다.} \quad (7)$$

따라서, boost 인덕터에 저장된 에너지의 일부는 자화 인덕터에 저장되지 않고 바로 2차 측 부하로 전달됨을 알 수 있다.

Ⅲ)  $[t_2 - t_3]$   $t_2$ 에서 boost 인덕터에 흐르는 전류는 영이 되고 boost 다이오드는 소거된다. 자화 인덕터  $L_{m1}$ 에 저장된 에너지만 2차 측으로 넘어가는 단계로 자화 인덕터에 흐르는 전류는  $[t_1 - t_2]$ 일 때와 같은 모양으로 나타나며  $i_{sec1}$ 은  $i_{Lm1}$ 과 비례하는 전류의 크기를 갖는다.

I), II), III)으로부터  $N_1$ 과  $N_2$ 의 비는 그림 2의 입력 전류 도통각  $\phi$ 를 결정하는 요소로서  $N_1$ 이 작아질수록 역률 (power factor)은 높아지나 I)에서 스위치 도통 시의 스위치를 통하지 않고 dlink로 가는 boost 인덕터 전류성분이 작아지므로 스위치의 전류 스트레스는 증가해 효율을 감소시킨다. II)에서 boost 인덕터에 저장된 에너지의 일부는 트랜스포머 자화에너지로 저장되지 않고 바로 부하로 전달되어 효율을 높인다.<sup>[1]</sup>

그림 3에서 볼 수 있듯이 boost 인덕터  $L_{d1}$ 과  $L_{d2}$ 에 흐르는 전류의 합이 라인 입력 전류  $i_{in}$ 이 된다. 라인 입력 전류의 리플은 스위칭 주파수의 두 배이며 리플의 크기는 크게 감소함을 볼 수 있다. 따라서 인터리빙 방식을 사용함으로써 입력 EMI 필터의 크기를 감소시킬 수 있다. 출력 커패시터로 흐르는 전류  $i_{Co}$ 는  $i_{sec1}$ 과  $i_{sec2}$ 의 합에 출력전류  $i_o$ 를 뺀 전류이며 스위칭 주파수의 두 배 ( $2f_s$ )의 주파수를 가지며 인터리빙 방식을 사용하지 않은 flyback 회로에 비해 절반 정도의 피크 전류치를 가진다. 이점은 flyback 토폴로지의 단점인 출력 고주파 리플의 크기를 줄여서 RFI 문제를 줄일 수 있고 상대적으로 출력 커패시터의 크기를 감소시킬 수 있다.

인터리빙 방식은 그림 4와 같이 모든 단일단 AC/DC 컨버터에 적용이 가능하다. 두개 이상의 단일단 컨버터를 사용할 수도 있으나, 구현의 복잡함과 생기는 이점의 정도를 고려해 볼 때 3개 이상의 컨버터는 자주 사용되지 않는다.<sup>[5]</sup>

#### 4. 실험 결과

그림 5는 본 실험에서 구현한 phase-shift의 방식을 보여준다. 스위치  $S_1$ 과  $S_2$ 의 게이트 파형은 180도 위상차를 가지며 duty는 50%를 넘을 수 없다. DC/DC단이 CCM으로 동작할 때 두개의 1차 스위치 전류는 전류공

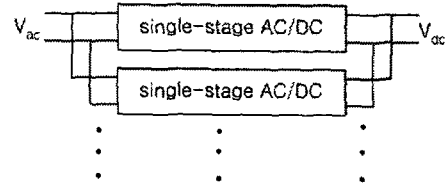


그림 4 일반적인 인터리빙 방식 단일단 AC/DC 컨버터  
Fig. 4 The generalized interleaved single-stage AC/DC converter

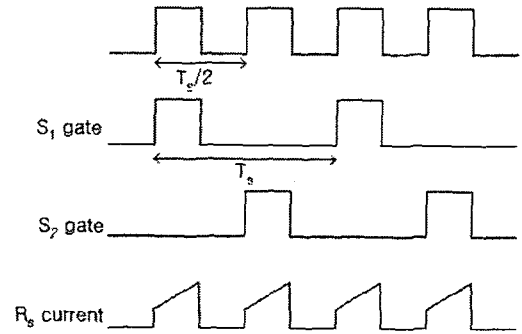


그림 5 phase-shift 구동 원리와 전류공유 방식  
Fig. 5 Phase-shifted driving principle and current-sharing method

유 (current-sharing)되어야 한다.

따라서 PWM 칩으로 두개의 출력을 가진 전류모드 제어기 UC3856을 사용하였고 두개의 스위치에 흐르는 전류가 한 개의 센싱 저항 ( $R_s$ )으로 흘러가도록 하여 각각의 전류의 크기를 센싱하도록 하였다. 180W (90W×2, 24V, 7.5A) 출력을 가지는 컨버터를 제작하였고 사용된 소자는 다음과 같다.

- 스위치 : 11N60C3 (11A, 600V)
- 트랜스포머  $T_1, T_2$  :  
 $N_1 : N_2 : N_3 = 3 : 3 : 2$   
 1차 자화 인덕턴스 : 500uH
- boost 인덕터 : 200uH

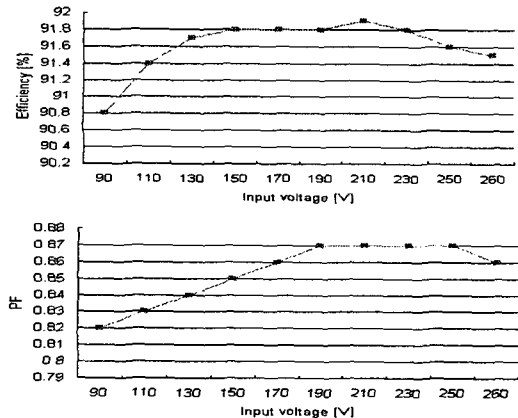


그림 6 효율과 역률 vs. 입력 전압  
Fig. 6 Efficiency and power factor (PF) vs. input voltage

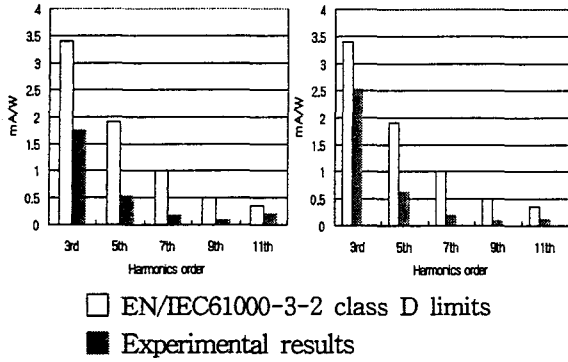


그림 7 110V와 220V 입력에서 고조파 비교  
Fig. 7 Harmonics comparison at 110V and 220V input

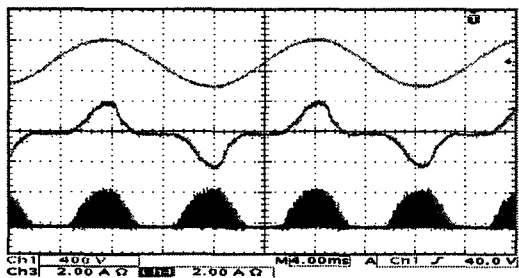


그림 8 입력 전압, 전류, boost 인덕터 전류  
Fig. 8 Input voltage, current, boost inductor current

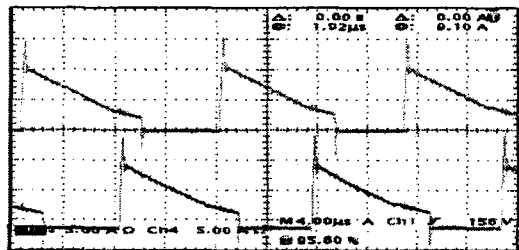


그림 9 출력 정류 다이오드 전류  
Fig. 9 Output rectifying diode current

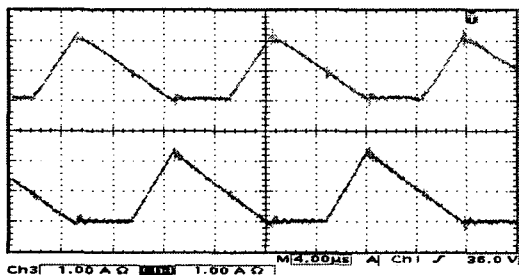


그림 10 boost 인덕터 전류  
Fig. 10 Boost inductor current

그림 6은 효율 및 역률을 나타낸다. 그림 7에서 단일 단 역률개선 회로를 사용하여 EN/IEC61000-3-2 class D 고조파 규정을 만족시킬 수 있으며, 그림 7, 8, 9에서는 각 소자의 전류 파형 및 입력전류 파형이 그림 3의 이론 파형과 일치함을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 두개의 단일단 DC/DC 컨버터를 인터리빙 방식으로 동작하도록 구현하였다. 제안된 회로는 다음과 같은 장점을 가진다.

- i) 고주파 입력전류 리플 감소로 EMI필터 크기 감소
- ii) 고주파 출력전압 리플 감소로 출력 커패시터 용량 감소
- iii) flyback을 응용한 단일단 회로를 사용하여 가격 절감 및 효율 증가

즉, 인터리빙 방식을 이용한 단일단 AC/DC 컨버터는 단일단 회로의 장점과 인터리빙 방식의 장점을 동시에 살릴 수 있다.

## 참고 문헌

- [1] Jinrong Qian; Qun Zhao; Lee, F.C., "Single-stage single-switch power-factor-correction AC/DC converters with DC-bus voltage feedback for universal line applications", Power Electronics, IEEE Transactions on, Vol. 13, Pages 1079 - 1088, Nov. 1998
- [2] Chongming Qiao; Smedley, K.M., "A topology survey of single-stage power factor corrector with a boost type input-current-shaper", APEC 2000. Fifteenth Annual IEEE, Vol. 1, 6-10, Pages:460 - 467, Feb. 2000
- [3] Jindong Zhang; Lee, F.C.; Jovanovic, M.M., "A novel interleaved discontinuous-current-mode single-stage power-factor-correction technique with universal-line input", PESC. 2001 IEEE 32nd Annual, Vol. 2, Pages:1007 - 1012, June 2001
- [4] Balogh, L.; Redl, R., "Power-factor correction with interleaved boost converters in continuous-inductor-current mode", APEC '93. Conference Proceedings 1993., Eighth Annual, 7-11, Pages 168 - 174, March 1993
- [5] Chan, C.H.; Pong, M.H., "Interleaved boost power factor corrector operating in discontinuous-inductor-current mode", Power Conversion Conference - Nagaoka 1997., Proceedings of the, Vol. 1, Pages 405 - 410, Aug. 1997
- [6] Zhang, M.T.; Jovanovic, M.M.; Lee, F.C.Y., "Analysis and evaluation of interleaving techniques in forward converters", IEEE Transactions on, Vol. 13, Pages 690 - 698, July 1998