

# ZVT 인터리브드 양방향 LDC의 순환전류 손실 저감을 위한 스위칭 주파수 변조 기법

박윤지\*, 이순령\*, 이종영\*, 정원상\*, 원충연\*  
성균관대학교\*

## Switching Frequency Modulation Method for Reduction of Circulating Current Loss in ZVT Interleaved Bidirectional LDC

Yun-Ji Park\*, Soon-Ryung Lee\*, Jong-Young Lee\*, Won-Sang Jung\*, Chung-Yuen Won\*  
Sungkyunkwan University\*

### ABSTRACT

본 논문에서는 ZVT 인터리브드 양방향 LDC의 순환전류 손실 저감을 위한 스위칭 주파수 변조 기법을 제안하였다. 제안된 컨버터 회로는 ZVT 동작을 수행하기 위해 보조 인덕터 전류가 부하 전류보다 커야하는 조건이 필요하다. 하지만 부하 전류 변화에도 불구하고 보조 인덕터 순환전류는 변하지 않고 같은 값을 유지하는 문제점이 있다. 따라서 부하 전류가 감소함에 따라 도통 손실이 발생하여 컨버터의 효율이 감소한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 부하 전류와 시비율에 따른 최적의 주파수 값을 적용하여 보조 인덕터 순환 전류의 크기를 변화시켰다. 따라서 도통 손실을 저감시켰고 컨버터의 전반적인 효율이 증가함을 확인하였다. 본 논문에서 제안된 기법은 실험을 통해 검증되었다.

### 1. 서론

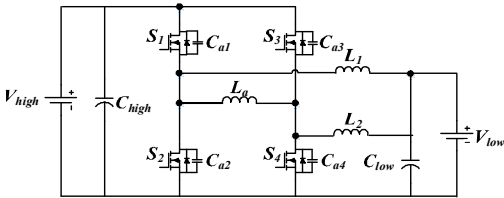


그림 1 ZVT 인터리브드 양방향 DC-DC 컨버터  
Fig. 1 ZVT Interleaved bidirectional DC-DC Converter

[1]에서 제안된 인터리브드 컨버터는 출력 전류의 리플을 저감하고 도통 손실을 줄여 효율을 개선할 수 있는 장점으로 인해 저전압, 대전류 시스템에 많이 사용된다. 또한 도통 손실 저감 효과, 양방향 구동 등의 목적으로 동기 스위치를 적용 시켜서 사용하는 경우가 많다. 스위칭 반도체 소자의 개수가 증가함에 따라 스위칭 손실이 증가하는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 보조 인덕터  $L_a$ 와 각 스위치에 보조 커패시터  $C_a$ 를 병렬 추가 구성으로 공진구간을 형성하여 ZVT 동작을 통해 스위칭 손실을 저감시켰다. 보조 회로는 최대 부하 범위에서 ZVT 동작을 유지할 수 있게 설계한다. 따라서 부하용량의 변화에도 보조 인덕터 전류는 최대 부하 기준 설계 값을 유지하고, 부하가 낮아지면 여분의 순환 전류로 도통 손실이 발생하여 컨버터의 전반적인 효율이 저하된다.

본 논문에서는 이러한 단점을 보완하여 [1]에서 제안된 LDC의

효율을 향상시킬 수 있는 주파수 변조 기법을 제안하였다. 제안하는 주파수 변조 기법은 공진구간 최소 전류를 만족하는 보조 인덕터 순환전류를 도출하여 적용시킴으로써 도통 손실을 저감시키고 효율을 개선하였다.

### 2. 본 문

#### 2.1 회로 동작

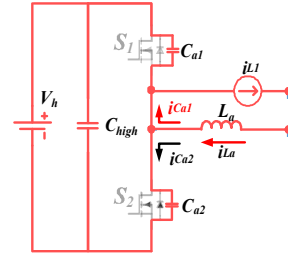


그림 2 공진 구간 동작 모드  
Fig. 2 Resonance section operation mode

그림 2은 공진 구간에서 전류가 흐르는 동작 모드를 나타낸다. 식 (1)의  $I_{La,peak}$ 는 보조 인덕터 순환전류의 최대 값, 식 (2)의  $i_{L1,min}$ 는 출력 전류의 최소값을 나타낸다. 출력전류  $I_L$ 와 보조 인덕터 순환전류  $i_{La}$ 가 각각 서로 다른 방향을 가지고 흐를 때 ZVT 조건을 구현하기 위해서 보조 인덕터 전류가 출력전류보다 커야한다.

$$I_{La,peak} = \frac{V_h D}{2L_a f} \quad (1)$$

$$i_{L1,min} = I_L^* - \frac{V_h - V_l}{2L_a} DT \quad (2)$$

#### 2.2 제안하는 주파수 변조기법

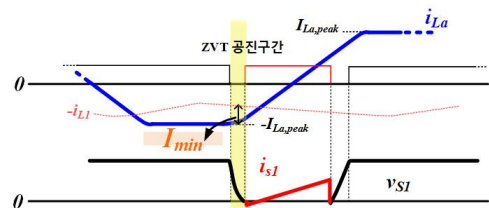


그림 3 보조 인덕터 전류와 출력 전류파형  
Fig. 3 Waveform of the auxiliary inductor and output current

부하 용량이 변하게 될 때 보조 인덕터 전류는 매우 높은 값을 나타내고 출력 전류 사이에 큰 공진 전류가 발생하게 되어 순환 전류 손실을 발생시킨다. 그러므로 출력 전류 변화에 따라 보조 인덕터 순환 전류의 피크 값을 제어 할 수 있는 주파수 변조기법이 필요하다. ZVT 동작을 하기 위해서는 보조 인덕터 순환 전류 최대 값과 출력 전류 사이의 공진 구간에서의 최소 전류를 확보해야한다. 식 (3)은 에너지 관점에서 보조 인덕터의 에너지가 스위치 두 개의 보조 커패시터의 에너지보다 커야하는 조건이다.

$$E_{La} \geq 2E_{Ca} \quad (3)$$

이 때 ZVT 조건을 만족하기 위해서는 공진 간에서 보조 커패시터의 최대 값이 입력 전압 보다 커야하며 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\sqrt{\frac{L_a}{2C_a}} I_{\min} \geq V_h \quad (4)$$

위의 식 (3), (4)를 통해 ZVT를 만족하는 최소 전류 식 (5)를 구하여 부하전류와 시비율에 따른 최적의 주파수 식 (6)를 도출하였다.

$$I_{\min} = \frac{D[V_h(L_1 + L_a) - V_l L_a]}{2L_a L_1 f_s} - I_L^* \quad (5)$$

$$f_s = \frac{D[V_h(L_1 + L_a) - V_l L_a]}{2L_a L_1 (I_{\min} + I_L^*)} \quad (6)$$

그림 4는 부하용량에 따른 스위칭 주파수 그래프이며 부하용량이 감소함에 따라 스위칭 주파수의 값이 증가함을 나타낸다.

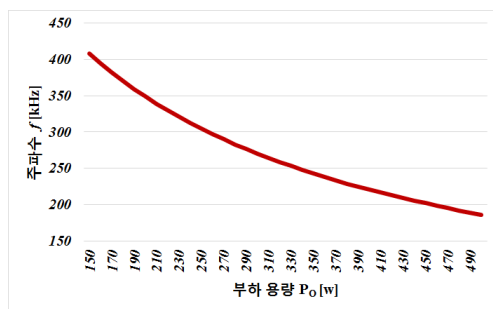


그림 4 부하용량에 따른 주파수  
Fig. 4 Switching frequency according to load capacity

### 2.3 실험 결과

그림 5는 [2]에서 제안된 최적설계기법이 적용된 컨버터에서 부하용량 500W기준의 최소 순환 전류 동작 주파수인 200kHz로 실험한 결과이다. 보조 인덕터 전류는 22[A], 출력 전류는 16[A]로 최소 공진 구간 전류가 형성되었다. 동일한 주파수와 파라미터 조건에서 부하용량이 250W로 감소하게 되면 출력전류 10[A], 보조 인덕터 전류는 22[A]로 공진 구간 전류가 증가되어 컨버터 효율이 감소한다. 그림 6는 본 논문에서 제안한 주파수 변조기법을 적용하여 부하용량 250W에 적합한 스위칭 주파수 300kHz로 실험 하였다. 보조 인덕터 전류는 11[A]로 10[A]가 감소하였으며 공진 구간 전류 6[A]를 만족하는 것을 확인 할 수 있었다. 그림 7은 하드 스위칭 컨버터, ZVT LDC, 주파수 변조 기법적용 컨버터들의 시험에 대한 효율 측정 결과이며, 주파수 변조기법으로 전반적인 컨버터의 효율 향상을 확인할 수 있었다.

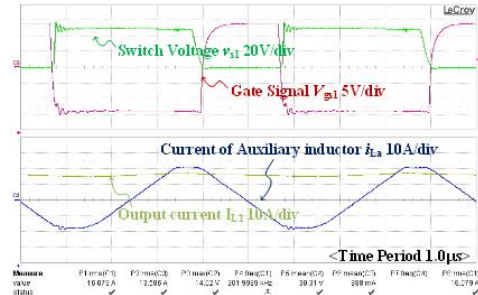


그림 5 기본 동작 실험 결과 파형  
Fig. 5 Waveform of basic operation experimental result

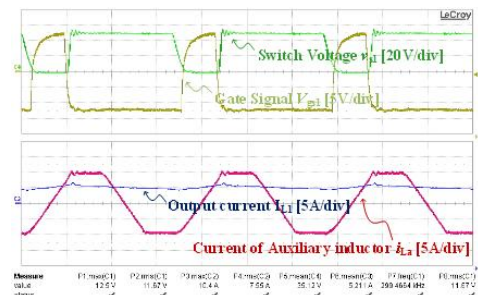


그림 6 제안된 기법 실험 결과 파형  
Fig. 6 Waveform of proposed method experimental result

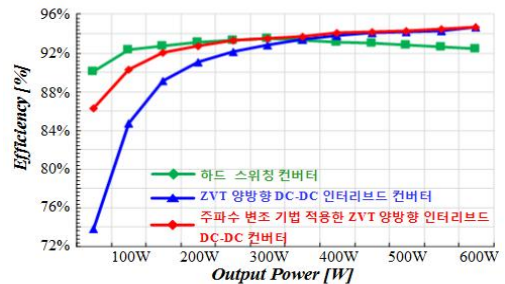


그림 7 효율 측정 결과  
Fig. 7 Results of measured efficiency

## 3. 결 과

본 논문은 ZVT 인터리브드 양방향 컨버터의 효율 향상을 위한 주파수 변조 기법을 제안하였다. ZVT 스위칭 동작 조건을 만족하는 최소 전류 관계식과 최적의 스위칭 주파수를 도출하였다. 따라서 순환전류를 최소화하였고 결과적으로 도통 손실을 저감 되었다. 제안하는 주파수 변조기법은 실험을 통해 효과를 검증하였다.

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No. 20164030200980)

### 참 고 문 헌

- [1] Lee, Soon-Ryung, et al. "48 V to 12 V soft-switching interleaved buck and boost converter for mild-hybrid vehicle application." Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2016 19th International Conference on. IEEE, 2016.
- [2] 이종영, et al. "보조 인덕터를 이용한 영-전압 스위칭 인터리브드 동기식 벡-컨버터의 최적 설계." 한국조명·전기설비학회 학술대회는문집 (2016): 19-19.