

## 동기정류기를 적용한 LLC 공진형 하프브릿지 DC-DC 컨버터

이광택, 안태영  
청주대학교 전자공학과

### LLC resonant half-bridge DC-DC converter with synchronous rectifier

Gwang-Taek Lee, Tae-Young Ahn  
Dept. of Electronics Eng. Cheongju Univ.

**Abstract** - In this paper results of the experiment which used LLC resonant Half Bridge DC-DC converter to a portable electrical equipment. LLC resonant Half Bridge DC-DC converter which was used in this experiment improved an efficiency because it reduced switching, conduction losses and with synchronous rectifier. As a result of the experiment, this proposed converter could verified an increase of 2% to the efficiency more than diode rectifier.

### 1. 서 론

최근 통신기 및 프로세서의 소비전력을 줄이기 위한 방법으로 전원장치의 저전압 대전류의 출력 특성을 요구하고 있으며, 이를 만족시키기 위해서 다이오드 정류방식 대신에 동기정류기를 이용한 회로방식이 증가하고 있다. 또한 공진형 컨버터는 원리적으로 스위칭 손실이 없기 때문에 높은 효율, 높은 주파수와 높은 전력밀도를 갖는 컨버터를 설계 할 수 있어서 설계 시 주목받고 있다. 특히 최근에는 전원장치의 제조가격을 줄일 수 있으면서 비교적 중대형 이상의 출력에서 효율적 운전이 가능한 회로방식 중의 하나인 LLC 공진형 Half Bridge 컨버터는 소프트 스위칭 기술을 사용하기 때문에 스위칭 손실이 적고, 변압기의 주요 스위치에 흐르는 전류의 실효값이 작기 때문에 고효율 운전이 가능하다. 본 논문에서는 동기정류기를 이용한 200W급 LLC 공진형 Half Bridge 컨버터의 효율특성을 분석하고 그 실험결과를 보고한 것이며, 그 결과 최대부하에서 94% 이상의 고효율을 달성할 수 있었으며 다이오드 정류방식에 비해서 약 4W 이상의 전력손실을 저감시킬 수 있었으며 특히 동기정류기용 MOSFET의 전압스트레스를 변압기의 2차 측에 가포화 인덕터를 직렬로 구성하여 효과적으로 저감시킬 수 있다는 것을 보여주었다<sup>[1]</sup>.

### 2. LLC 공진형 Half Bridge 컨버터

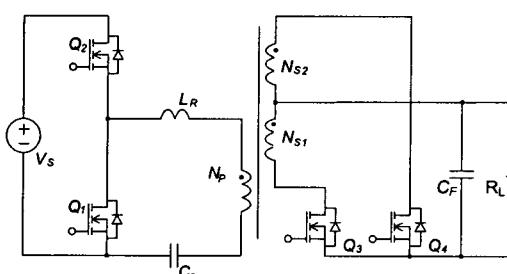


그림 1. LLC 공진형 Half Bridge DC-DC 컨버터  
Fig. 1 LLC resonant Half Bridge DC-DC converter

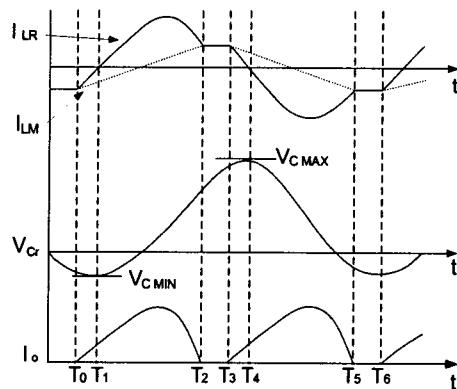
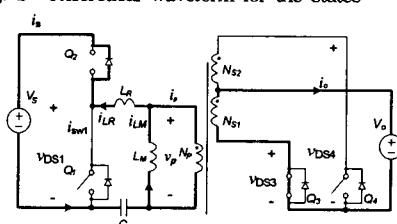
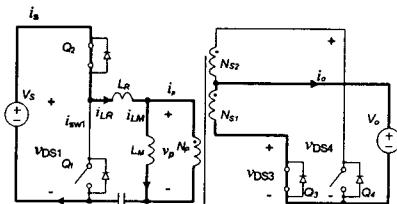


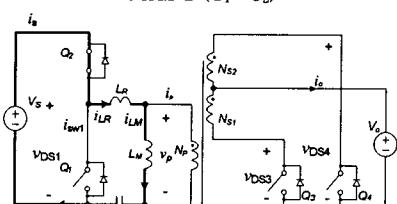
그림 2. 각 상태별 이론 동작 과정  
Fig. 2 Theoretical waveform for the states



Mode 1 ( $T_0 \sim T_1$ )



Mode 2 ( $T_1 \sim T_2$ )



Mode 3 ( $T_2 \sim T_3$ )

그림 3. 각 상태별 등가회로  
Fig. 3 Equivalent circuit for states of behavior

그림 1은 동기정류기를 적용한 LLC 공진형 Half Bridge DC-DC 컨버터의 기본 회로를 나타내었다.

그림 2는 회로가 정상상태에서 동작하는 경우 주요 소자의 전압과 전류의 이론파형을 나타낸 것이다. 그림에서  $V_G$ 에 걸리는 전압과  $L_R$ 과  $L_M$ 에 흐르는 전류와 그에 따른 2차측 출력 전류  $I_o$ 를 나타내었다. 그림 3에서는 그림 2의 등가회로가 정상 상태에서 동작한다는 가정 하에  $Q_1$ ,  $Q_2$ 와  $Q_3$ ,  $Q_4$ 의 동작을 각 상태별로 나타낸 상태별 등가회로이다.

Mode 1 ( $T_0 \sim T_1$ )

이 구간은  $T_0$ 에서  $Q_1$ 이 오프된다. 이 때 공진 인덕터  $L_R$ 에 역전류가 흐르게 되고 이 전류는  $Q_2$ 의 기생 다이오드를 통해 흐르는 동안  $Q_2$ 는 ZVS에 도달하게 된다. 그리고 변압기의 1차 측 전압  $v_p$ 은 입력전압  $V_s$ 와 같아지게 되고, 2차측에 정전압이 유기됨에 따라  $Q_2$ 가 턴 온 되어 전류를 도통시키게 된다.  $Q_1$ 는 역 바이어스 상태가 되기 때문에 오프 상태가 된다.

Mode 2 ( $T_1 \sim T_2$ )

이 구간은  $Q_2$ 가 턴 온 되고  $Q_1$ 은 오프 상태이다. 공진 인덕터  $L_R$ 에 흐르는 전류  $I_{LR}$ 은 정방향이 되고 사인곡선을 가지며 증가하게 된다. 최대 전류가 되는 시점에 도달하게 된 후  $T_2$ 에서  $L_M$ 과  $L_R$ 에 흐르는 전류  $I_{LR}$ ,  $I_{LM}$ 이 거의 같아진다.

Mode 3 ( $T_2 \sim T_3$ )

$L_R$ 과  $I_{LM}$ 이 같아지면서 변압기에 흐르는 전류는 0이 된다. 따라서 2차측의  $Q_2$ ,  $Q_3$ 는 오픈 상태이다. 이 구간이 끝나는  $T_3$  바로 전에서  $Q_3$ 는 오프되며  $Q_1$ 도 오프되어 있는 상태로써 데드 타임이 존재하게 된다. 나머지 반주기 동작은 앞의 주기설명과 같이 해석할 수 있다. 주파수 변조가 필수인 LLC 공진형 Half Bridge에서 스위칭 주파수  $fs$ 와 공진 주파수  $f_r$ 의 두 개의 주파수로 나누어 해석하면, 아래식과 그래프로 해석할 수 있다.

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{jw_n K_L}{jw_n(K_L + 1 - \frac{1}{w_n}) + K_L(1 - w_n)Q} \quad (1)$$

$$K_L = \frac{L_M}{L_R} \quad (2)$$

$$w_n = \frac{f_s}{f_r} \quad (3)$$

$$Q = \frac{Z_o}{R_{AC}} \quad (4)$$

$$w_o = \frac{1}{\sqrt{L_R C_R}} \quad (5)$$

$$Z_o = \sqrt{\frac{L_R}{C_R}} \quad (6)$$

$$R_{AC} = \frac{8}{\pi^2} R_o n^2 \quad (7)$$

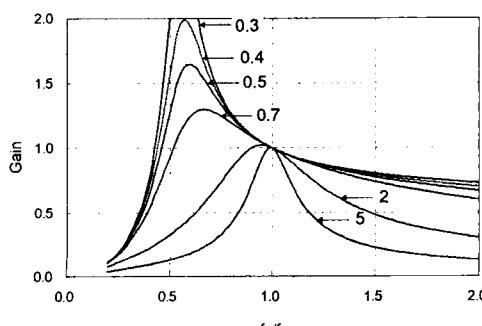


그림 4. 주파수특성

Fig. 4 Characteristic of frequency

$$v_s = \frac{1}{N} \times v_p \quad (8)$$

그리고 1차측의  $Q_2$  스위치가 턴 온 되어 2차측으로 유기될 때 2차측의 구동회로를 통한  $Q_3$ 를 턴 온 시킴으로써 저 전력 손실의 동기정류기가 구동하게 된다.

### 3. 실험 결과

본 논문에서는 다이오드와 동기 정류기를 이용한 200W LLC Half Bridge DC-DC 컨버터를 구성하였으며, 기본 구성은 표 1과 같은 사양의 실험회로를 구성하였다.

그림 5는 본 논문에서 제안한 동기정류기를 적용한 LLC 공진형 Half Bridge 컨버터이다. 1차측의 스위치가 턴 온 되어 2차측으로 전압이 유기될 때 2차측의 구동회로를 통한 2차측 스위치를 턴 온 시킴으로써 저 전력 손실의 동기정류기가 구동하게 된다.

그림 6의 (a), (b)는 실험회로가 정상상태에서 동작하는 경우 각소자의 전압과 전류를 측정한 실험파형이다. 파형 (b)를 통해 앞 절에서 논했던 이론 파형이 사실임을 확인할 수 있다. 그리고 그림 7의 (a), (b)는 동기정류기를 적용하였을 때 나타나는 2차측의 MOSFET의  $V_{DS}$ 를 나타낸 실험파형이며 낮은 부하에서 나타나는 전압 스트레스를 변압기의 2차측과 2차측 스위치의  $V_{DS}$ 사이에 가포화 코어를 삽입함으로써 2차측 전압 스트레스가 저감됨을 나타내는 실험파형이다. 그림 8은 실험회로에서 다이오드와 동기정류기를 사용했을 때의 효율을 측정하여 비교하여 나타낸 그래프이며, 그림으로부터 LLC 공진형 Half Bridge 컨버터가 중 부하 이후 다이오드가 92%가 넘는 고효율을 나타내고 있으며 동기정류기를 적용한 컨버터에는 다이오드보다 2%가 증가된 효율을 나타내고 있다. 그림 9는 동기정류기를 사용했을 때의 다이오드를 사용했을 때의 전력 손실을 그래프로 나타내었고, 그림 10은 동기정류기와 다이오드를 사용했을 때의 각각의 주파수변화를 나타낸 그래프이다. 스위칭 주파수는 통상 65kHz~75kHz이며 무부하시에는 최대 95kHz까지 변화하는 것을 확인하였다.

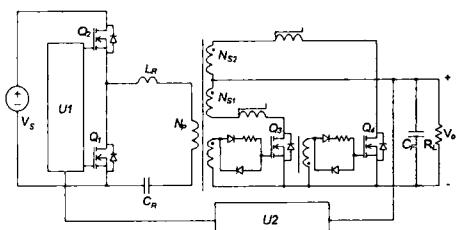


그림 5. 실험 회로  
Fig. 5 Experimental circuit

표 1. 실험 사양

Table 1. Specifications

Parameters	Name	Value	Unit
Input voltage	$V_s$	380	[V]
Output voltage	$V_o$	12	[V]
Maximum load current	$I_o$	17	[A]
Maximum power	$P_o$	200	[W]
Resonant inductor	$L_M$	300	[μH]
Magnetizing inductor	$L_R$	130	[μH]
Resonant capacitor	$C_R$	64	[nF]
Turns ratio of transformer	$n(n=N_o/N_{S1}, N_{S1}=N_{S2})$	18	-

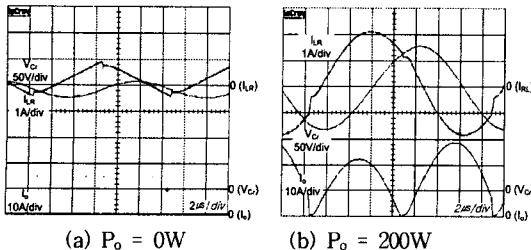


그림 6. 실험 파형  
Fig. 6. Experimental waveform

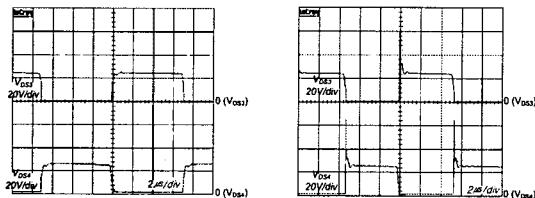


그림 7. 가포화 코어의 효과  
Fig. 7. Effect of saturable core

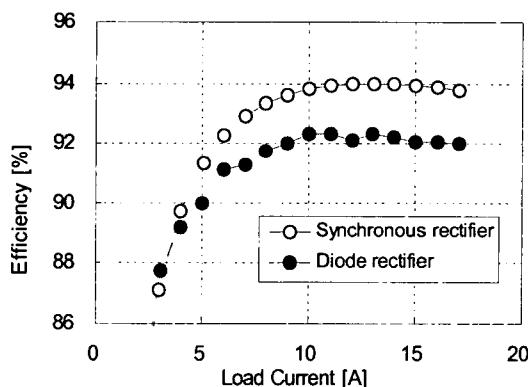


그림 8. 전력변환 효율  
Fig. 8. Power conversion efficiency

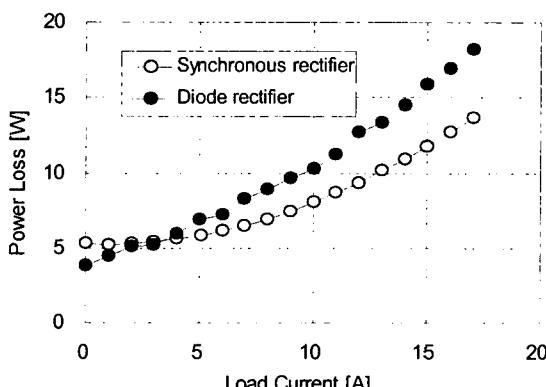


그림 9. 부하전류에 대한 전력손실  
Fig. 9. Power loss for load current

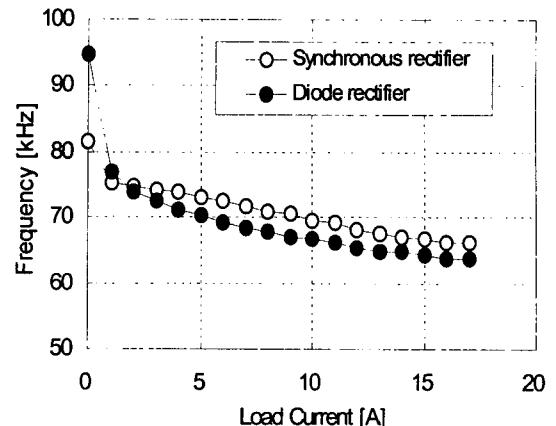


그림 10. 부하전류에 대한 주파수변화  
Fig. 10. Frequency change for load current

#### 4. 결론

본 논문에서는 동기정류기를 이용한 200W급 LLC 공진형 Half Bridge DC-DC 컨버터의 효율특성에 대해 실험결과를 보고한 것이다. 일반적으로 LLC 공진형 Half bridge 컨버터는 원리적으로 스위칭 손실이 적고 각 소자에 흐르는 전류의 실효값이 기존의 회로에 비해서 작기 때문에 비교적 고효율의 회로구현이 가능하였다. 특히 다이오드 정류방식의 경우 최대부하에서 약 92%의 최대효율을 얻은 것에 비해서 동기정류기를 사용하는 경우 94%의 효율 개선을 얻을 수 있었으며 그 결과 4W 이상의 전력손실을 저감시킬 수 있었다. 특히 실험결과 동기정류기용 MOSFET의 전압스트레스가 부하전류에 비례하여 증가하기 때문에 상대적으로 온저항 값이 큰 높은 정격전압의 스위치를 사용하기 때문에 손실이 증가하였는데, 변압기의 2차 측에 가포화 인덕터를 직렬로 구성하여 효과적으로 저감시킬 수 있다는 것을 보여주었다.

이 논문은 산업자원부·한국산업기술 평가원 지정 청주 대학교 정보통신연구센터의 지원에 의한 것입니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Bo Yang, Ffed C. Lee, Alpha J. Zhang, Guisong Huang, "LLC Resonant Converter for Front End DC/DC Conversion", APEC 2002, Vol 2, pp. 1108-1112, 10-14 March 2002.
- [2] Furukawa Y, Morita K, Yoshikawa T, "A High Efficiency 105W DC/DC Converter", Telecommunications Energy Conference, INTELEC, 16th International, 1994 pp. 148-154
- [3] ROBERT L STEIGERWALD, "A Comparison of Half-Bridge Resonant Converter Topologies" IEEE Transactions on power electronics, Vol 3, No.2, April 1988, pp. 174-182.