

# Symmetrical Voltage Doubler Rectifier(SVDR)가 적용된 LLC공진형 DC/DC컨버터

윤광호, 정봉근, 심치화, 품소피악, 김은수<sup>†</sup>  
진주대학교

## LLC Resonant Converter with Symmetrical Voltage Doubler Rectifier(SVDR)

K.H Yoon, B.G Jeong, C.H Sim, S. Phum, E.S Kim<sup>†</sup>  
Jeon-Ju University

### 1. 서론

최근 가전기기 및 태양광 발전 PCS를 위한 DC/DC컨버터의 고효율과 슬림화 추세에 맞춰 이에 대응할 수 있는 고집적 전원장치 개발이 요구되고 있다. 이러한 요구조건을 만족하기 위해 많은 ZVS DC/DC Converter들이 연구되어왔고<sup>[1]</sup>, 최근에는 전력밀도 및 효율특성을 더욱 증가시키기 위해 LLC직렬공진컨버터가 적용되고 있다. 하지만 현재 가장 널리 사용되고 있는 기존 단일변압기로 구성된 LLC공진컨버터의 경우 그림1에서 볼 수 있듯이 주 스위칭소자(Q<sub>1</sub>)가 턴 온 했을 때 입력 측 전류가 흐르게 되고 턴 오프 했을 때에는 입력 측 전류가 전달되지 않기 때문에 최대전류는 증가 하게 되면 입력커패시터의 리플전류가 증가하게 되어 입력커패시터의 용량 및 부피가 커지게 되고 비용이 증가하게 되며 1차측 권선의 전류가 증가하기 때문에 단일변압기만으로 컨버터 구성 시 권선의 두께가 증가하게 되고 권선손실의 증가에 따라 슬림화 및 고 효율을 위한 최적설계에 제약을 받게 된다.

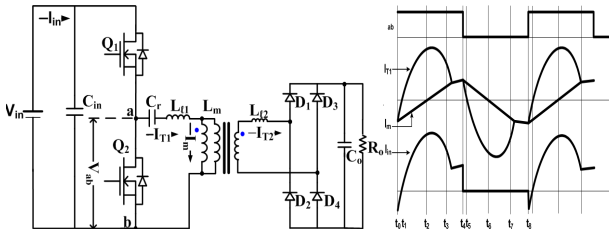


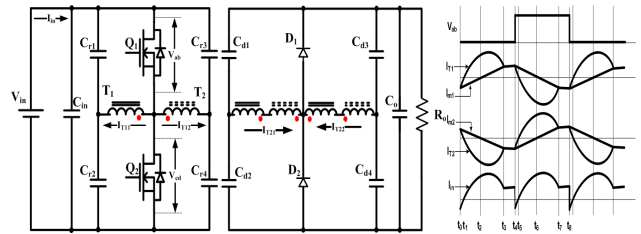
그림 1 기존 LLC공진컨버터 주 회로 및 각부 파형

본 논문에서는 이러한 단일변압기의 문제점을 개선하기 위해 그림2에서 볼 수 있듯이 두 개의 공진회로로 구성된 LLC공진컨버터를 제안 하였고, Math-CAD의 시뮬레이션을 바탕으로 입력전압 250V<sub>DC</sub>-400V<sub>DC</sub>, 출력전압 430V<sub>DC</sub>, 출력용량 1500W를 제작하여 실험하였고, 효율을 측정하였다.

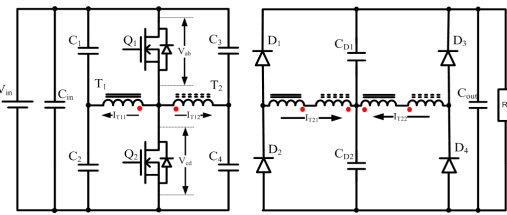
### 2. 주회로 구성

그림 1의 기존 단일변압기를 적용한 LLC공진컨버터에서의 단점을 보완하기 위하여 그림 2에 나타난 LLC공진컨버터를 제안하였다. 그림 2(a)에 나타난 것처럼 두 개의 변압기(T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>)를 각각의 독립된 공진탱크회로를 구성함으로써 주 스위칭 소자 Q<sub>1</sub>이 턴-오프되고 Q<sub>2</sub>가 턴-온할 때 입력 측 전류는 공진커패시터C<sub>r1</sub>, C<sub>r3</sub>로 통하여 전류가 흐르면서 충전하는 공진회로가 동작된다. 공진커패시터 C<sub>r2</sub>, C<sub>r4</sub>를 통하여 방전하는 공진회로가 동작된다. 또한 Q<sub>1</sub>이 턴-온되고 Q<sub>2</sub>가 턴-오프 되었을 때 입력측전류는 공진커패시터 C<sub>r2</sub>, C<sub>r4</sub>를 통하여 충전하는 공진회로가 동작되고, 공진커패시터C<sub>r1</sub>, C<sub>r3</sub>를 통하여 방전하는 공진회로가 동작된다. 따라서 최대전류는 절반으로 줄일 수 있

는 장점을 가지게 되고 입력 측 리플전류를 저감하게 되어 입력 커패시터의 용량을 줄일 수 있는 장점을 가지게 된다. 또한 주회로의 변압기 (T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>)가 병렬로 구성되어 1차측 공진회로의 자화전류 및 공진전류를 1/2씩 줄일 수 있고, 변압기에서 발생하는 열적 스트레스를 최소화 할 수 있다. 따라서 변압기의 1차측 권선의 두께 줄일 수 있으므로 슬림화 하는데 장점을 가지는 회로이다. 또한 직렬공진커패시터가 주 스위칭소자와 대칭으로 병렬구성되어 있어 1차측 공진회로에 흐르는 전류스트레스를 저감할 수 있으므로 공진커패시터의 용량과 부피를 줄일 수 있는 장점을 가지게 된다. 두 개의 변압기(T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>) 2차측에 흐르는 전류의 불균형을 방지하기 위하여 각각의 권선을 상호 직렬 연결하였고, 2차측정류회로에는 두 배의 전압이득을 가질 수 있는 Symmetrical Voltage Doubler Rectifier 회로를 적용하였다.



(a) 제안된 공진컨버터 주 회로1 및 각부 파형



(b) 제안된 공진컨버터 주 회로2

그림 2 제안된 LLC공진컨버터 주회로 및 각부 파형

### 2.1 전압이득특성

본 논문에서 제안된 LLC공진컨버터의 주회로는 변압기(T<sub>1</sub>)와 직렬공진커패시터(C<sub>r1</sub>, C<sub>r2</sub>)로 구성된 공진회로1과 변압기(T<sub>2</sub>)와 직렬공진커패시터(C<sub>r3</sub>, C<sub>r4</sub>)로 구성된 공진회로2로 되어 있다. 두 개의 공진회로가 동작 시 2개의 입력전원이 존재하기 때문에 별도의 전압원(V<sub>ab</sub>, V<sub>cd</sub>)를 T형 등가회로로 변환하기 위해서는 중첩원리(Superposition Theory)를 적용하여 등가회로로 변환하는 방법으로 이를 적용한 T형 등가회로는 그림3에 나타내었다.

### 3. 실험결과

본 논문에서는 1500W급 정격 출력용량을 가지는 고효율과 고집적화를 하기 위한 방법으로 독립된 공진회로를 가지는 제안된 LLC공진컨버터를 적용하여 입력전압 250V<sub>DC</sub>일때의 조건에서 최대정격출력용량 900W(430V<sub>DC</sub>/2.1A)에 대하여 실험하였고, 입력전압400V<sub>DC</sub>의 조건에서 최대정격출력용량 1500W(430V<sub>DC</sub>/3.488A)에 대하여 실험하였다. 그림 5은 제안된 컨버터의 실험파형으로 입력전압 250V<sub>DC</sub>, 입력전압 400V<sub>DC</sub>일때 각각의 1차측 단자전압 ( $V_{ab}$ ,  $V_{cd}$ )과 단자전류 ( $I_{T11}$ ,  $I_{T12}$ )를 측정 한 파형이다. 실험결과 그림4의 부하변화에 따른 전압이득 특성 시뮬레이션 결과와 비교하여 이득특성 및 동작 스위칭 주파수 범위가 일치하는 것을 확인 하였다. 그림5에서 나와 있는 것처럼 모든 부하조건에서 단자전류 ( $I_{T11}$ ,  $I_{T12}$ )는 단자전압 ( $V_{ab}$ ,  $V_{cd}$ )에 대하여 항상 지상전류가 흐르고 있기 때문에 주스위칭소자( $Q_1$ ,  $Q_2$ )는 최대정격부하(1500W)에서 항상 영전압스위칭 (ZVS)동작됨을 확인할 수 있었다. 또한 효율측정결과 입력전압250V<sub>DC</sub>에서 600W일 때 97.65%의 효율이 측정되었고, 입력전압400V<sub>DC</sub>에서 700W일 때 98%의 효율이 측정되었다. 따라서 입력전압400V<sub>DC</sub>에서의 부하별(100W-1500W) 평균효율은 97.16%로 나타났다.

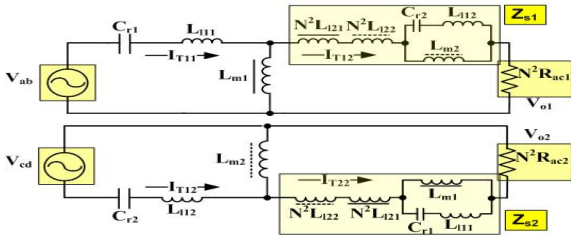


그림 3 제안된 LLC공진컨버터 등가회로

그림 3의 등가회로에서 얻어진 입력전압  $V_{ab}$ , 출력전압  $V_{o1}$ 에 대한 전압이득특성을  $G_1$ , 입력전압  $V_{cd}$ 와, 출력전압  $V_{o2}$ 에 대한 전압이득특성을  $G_2$ 로 나타낼 수 있다. 따라서 두 개의 공진회로를 가지는 LLC공진컨버터의 전압이득특성  $G$ 는 식1에서처럼 나타낼 수 있다.

$$G_1 = \frac{1}{N} \cdot \frac{1}{\left(1 + A_1 - \frac{1}{\omega^2 L_{m1} C_{r1}}\right) \left(1 + \frac{Z_{s11}}{N^2 R_{ac1}} + j \frac{\omega L_{m1}}{N^2 R_{ac1}} \left[\left(1 + A_1 - \frac{1}{\omega^2 L_{m1} C_{r1}}\right)(B_1 + 1) - 1\right]\right)} \quad (1)$$

$$G_2 = \frac{1}{N} \cdot \frac{1}{\left(1 + A_2 - \frac{1}{\omega^2 L_{m2} C_{r2}}\right) \left(1 + \frac{Z_{s21}}{N^2 R_{ac2}} + j \frac{\omega L_{m2}}{N^2 R_{ac2}} \left[\left(1 + A_2 - \frac{1}{\omega^2 L_{m2} C_{r2}}\right)(B_2 + 1) - 1\right]\right)} \quad (2)$$

$$G = G_1 + G_2 \quad (3)$$

본 논문에서 설계된 변압기를 직접 제작하여 측정된 파라미터를 표 1에 표시 하였다. 그림 4는 설계된 변압기를 제작하여 측정된 파라미터를 적용하여 부하 ( $N^2 R_{ac}$ )변화에 따른 전압이득특성( $V_o/V_{in}$ )을 알아보기 위해 Math-CAD를 이용한 시뮬레이션 결과이다. 부하가 모두 단락( $N^2 R_{ac1} = N^2 R_{ac2} = 0$ )일 때의 주파수를  $f_n$  ( $f_s/f_r$ )으로 나타내었다. 이때의 공진주파수는 114.6kHz이고, 입력전압250V<sub>DC</sub>일 때 각 부하별 (10W-900W)에서 동작시 스위칭주파수는 70kHz-63kHz에서 동작함을 확인할 수 있었고, 입력전압400V<sub>DC</sub>일 때 각 부하별(10W-1500W)에서 동작시 스위칭주파수는 108kHz-116kHz에서 동작함을 확인할 수 있었다.

표1 측정된 변압기 파라미터

	변압기 T <sub>1</sub>		변압기 T <sub>2</sub>	
1차측누설인덕턴스	$L_{l11}$	21.02uH	$L_{l12}$	21.51uH
2차측누설인덕턴스	$L_{l21}$	2.498uH	$L_{l22}$	2.2915uH
자화인덕턴스	$L_{m1}$	267uH	$L_{m2}$	260.2uH
등가누설인덕턴스	$L_{eq1}$	43.85uH	$L_{eq2}$	42.58uH
$N(n_1/n_2)$	2 (22/11)		2 (22/11)	
직렬공진커패시터( $C_{r1}$ , $C_{r2}$ , $C_{r3}$ , $C_{r4}$ )	22nF			
적용코아	코아: EER4042			

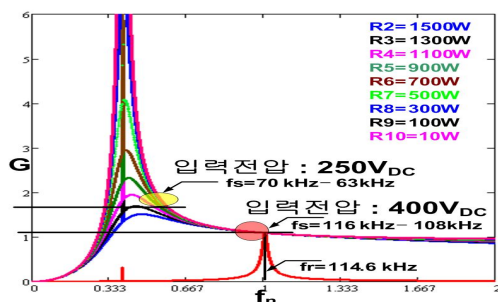


그림 4 부하변화에 따른 전압이득 특성

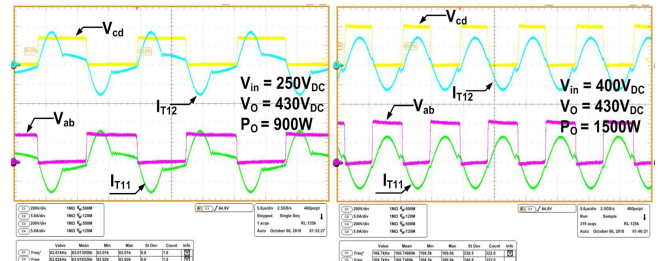


그림 5 입력전압변화에 따른 각부 파형

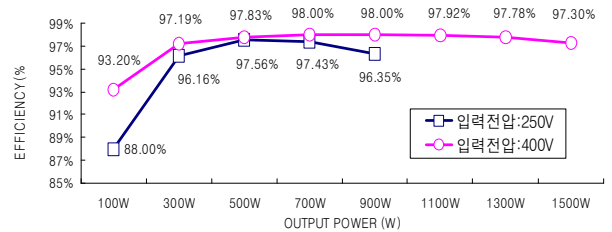


그림 6 효율 특성

### 4. 결론

본 논문에서 기존 단일변압기 LLC공진컨버터에서의 단점을 개선하기 위하여 두 개의 변압기를 적용 LLC공진컨버터를 제안하였고, 적용가능함을 보여주기 위해 1500W급 LLC공진컨버터를 제작하여 실험하였다. 제작된 변압기의 파라미터와 Math-CAD의 시뮬레이션과 일치하는 것을 확인 하였고, 실험 결과 효율측정결과 93.2%-98%의 효율의 결과를 나타내었다.

이 논문은 한국연구재단(KRF-2008-313-D00369)주관으로 수행된 과제임

### 참고 문헌

- [1] B. Lu, W. Liu, Y. Liang, F. C. Lee and J. D. can Wyk, "Optimal design methodology for LLC resonant converter", IEEE APEC'06, pp. 533-538, 2006.
- [2] 김주훈, 강성인, 김은수, 전용석, 이재삼, 허동영 "두개의 변압기와 공진 탱크로 구성된 LLC 공진 컨버터" 전력전자학회논문지 제14권 제5호, pp 406 ~ 414