

# 보조스위치와 보조인덕터 적용 양방향 SLLC 공진컨버터 동작특성

허예창, 주종성, 이지철, 김은수<sup>†</sup>  
 전주대학교

## Operational Characteristics of A Bidirectional SLLC Resonant Converter Using Auxiliary Switches and Inductor

Y.C Heo, J.S Joo, J.C Lee, E.S Kim<sup>†</sup>  
 JeonJu University\*

### ABSTRACT

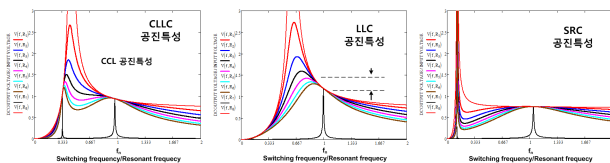
A bidirectional secondary LLC resonant converter with auxiliary switches and an additional inductor is proposed to achieve the high gain characteristics of LLC resonant converters. Auxiliary switches, an additional inductor and a resonant capacitor are connected in the high voltage secondary side of the proposed converter. The ac analysis and operating characteristics of bidirectional secondary LLC resonant converter are investigated. A 1kW prototype bidirectional secondary LLC resonant converter connected to the 400V<sub>DC</sub> buses is designed and tested to confirm the validity and applicability of the proposed converter.

### 1. 서론

최근 ESS(Energy Storage System) 및 전기자동차 등의 배터리 충·방전 시스템을 위한 양방향 DC/DC 컨버터에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 양방향 DC/DC 컨버터로 승·강압 컨버터와 위상천이(Phase-Shifted) 풀-브리지(Full-Bridge)회로가 적용되고 있으나, 모든 입력전압, 부하조건에서 소프트스위칭이 어렵고, 전압스트레스 및 노이즈 발생문제를 가지고 있다.

크기 및 스위칭 손실, EMI(Electro-Magnetic Interference) 저감이 가능한 공진형 컨버터를 접목한 양방향 DC-DC 컨버터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>[1]</sup> 공진형 컨버터에는 대표적으로 CLLC와 LLC 컨버터가 있다. CLLC 공진컨버터의 경우 그림 1(a)와 같은 공진이득특성으로 인해 양방향 전력전달에 있어 이득제어의 어려움이 있고, 특히 부하변화시(중부하) 하드스위칭(Hard-Switching)의 문제를 가지고 있다. 그림 1(b)의 LLC 공진회로의 공진이득특성은 순방향에 있어 이득제어를 할 수 있지만, 역방향 전력전달 시는 그림 1(c)와 같은 직렬공진(SRC) 이득특성에 의해 이득제어가 어렵다.

본 논문에서는 그림 2와 같이 2차측에 보조스위치와 보조인덕터를 적용해 순방향 및 역방향 동작 시 모두 LLC 공진이득 특성을 갖는 양방향 SLLC 공진컨버터를 제안 구현하였다.<sup>[2,3]</sup>



(a) CLLC이득특성 (b) LLC 이득특성 (c) SRC 이득특성  
 그림 1 공진커패시터 값에 따른 양방향컨버터의 이득특성

### 2. 제안된 SLLC 양방향 SLLC 공진컨버터

제안된 양방향 SLLC 공진컨버터 저전압단은 풀-브리지(Q<sub>1</sub>~Q<sub>4</sub>)와 변압기(TR) 1차측이 연결되어 있고, 변압기(TR) 2차측에 보조인덕터(L<sub>A</sub>)와 스위칭소자(Q<sub>5</sub>,Q<sub>6</sub>) 및 다이오드(D<sub>7</sub>, D<sub>8</sub>), 보조스위치(S<sub>A1</sub>,S<sub>A2</sub>)로 구성되어 있다. 순방향 동작 시 2차측 누설인덕턴스(L<sub>2</sub>)와 2차측 보조인덕터(L<sub>A</sub>), 공진커패시터(C<sub>S</sub>)와의 공진으로 LLC 공진특성이 나타나도록 하였고, 역방향 동작 시에는 1차측 누설인덕턴스(L<sub>1</sub>)과 2차측 누설인덕턴스(L<sub>2</sub>), 자화인덕턴스(L<sub>m</sub>), 공진커패시터(C<sub>S</sub>)와의 공진을 이용해 LLC 공진이득특성이 나타나도록 구성하였다.

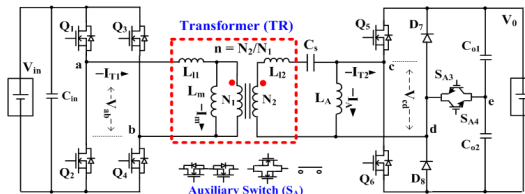
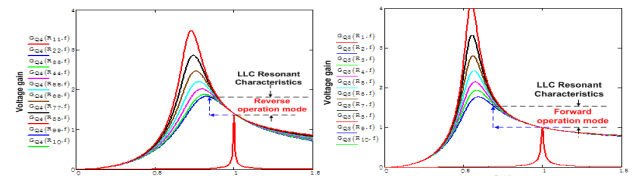


그림 2 제안된 SLLC 양방향 SLLC 공진컨버터



(a) 순방향 동작 (b) 역방향 동작  
 그림 3 SLLC 양방향 SLLC 공진컨버터 전압이득특성

### 2.1 순방향 동작특성

순방향 동작은 그림 4에 나타난 바와 같이 1차측 스위칭소자(Q<sub>1</sub>,Q<sub>2</sub>,Q<sub>3</sub>,Q<sub>4</sub>)가 50% 듀티비로 Turn-on/off하여 풀-브리지 회로로 동작해 2차측에 에너지를 전달하고, 2차측 보조스위치(S<sub>A1</sub>,S<sub>A2</sub>)와 스위칭소자(Q<sub>5</sub>,Q<sub>6</sub>)가 Turn-off된 상태로 스위칭소자(Q<sub>5</sub>,Q<sub>6</sub>)의 역·병렬다이오드와 다이오드(D<sub>7</sub>,D<sub>8</sub>)로 구성된 전파정류회로를 통해 2차측 공진전류(I<sub>T2</sub>)가 흐른다. 이때 2차측 공진전류(I<sub>T2</sub>)는 2차측 누설인덕턴스(L<sub>2</sub>)와 보조인덕터(L<sub>A</sub>), 공진커패시터(C<sub>S</sub>)에 의해 결정된다. 순방향 동작시 그림 3(a)에 나타난 전압이득특성과 같이 동작하게 된다.

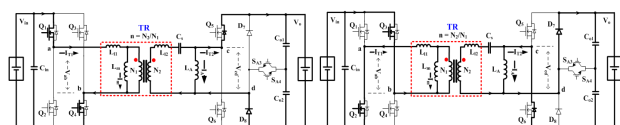


그림 4 순방향 동작모드

## 2.2 역방향 동작특성

그림 5에 나타낸 바와 같이 역방향 동작은 1차측 스위칭소자( $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$ )가 Turn-off하여 역·병렬다이오드를 통해 전파정류회로로 동작하게 된다. 2차측의 스위칭소자( $Q_5, Q_6$ )는 50% 듀티비로 Turn-on/off하고 보조스위치( $S_{A1}, S_{A2}$ )가 Turn-on되어 하프-브리지(Half-Bridge) 회로로 동작하며 1차측으로 에너지를 전달하게 된다. 이때 1차측 공진전류( $I_{T1}$ )는 공진커패시터( $C_s$ )와 2차측 누설인덕턴스( $L_2$ ), 1차측 누설인덕턴스( $L_1$ )과 자화인덕턴스( $L_m$ )에 의하여 결정되고, 보조인덕터( $L_A$ )는 공진이득 특성에는 영향을 주지 않고 순환전류( $I_A$ )만 흐르게 된다.

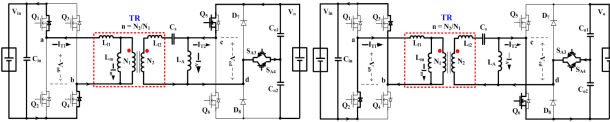


그림 5 역방향 동작모드

## 3. 실험결과

본 논문에서는 보조스위치와 보조인덕터를 2차측에 적용하여 순방향 및 역방향 동작 시에 LLC 공진이득특성을 갖는 양방향 SLLC 공진컨버터를 제안하고 1kW급 시제품 제작 및 실험을 통해 검증하였다. 표 1은 주요 정격과 파라미터, 실험에 사용한 소자를 나타내었다.

표 1 주요 정격 및 파라미터, 실험에 사용한 소자

순방향 동작 시 주요 정격			
입력전압( $V_{in}$ )	41V <sub>dc</sub> ~60V <sub>dc</sub>		
출력용량( $P_o$ )	1kW(400V <sub>dc</sub> /2.5A)		
스위칭주파수/공진주파수( $f_m$ )	42.39kHz/55.17kHz/112.9kHz		
역방향 동작 시 주요 정격			
입력전압( $V_{in}$ )	400V <sub>dc</sub>		
출력용량( $P_o$ )	1kW(41V <sub>dc</sub> ~60V <sub>dc</sub> /2.5A~17A)		
스위칭주파수/공진주파수( $f_m$ )	53.85kHz/79.6kHz/109.8kHz		
파라미터	1차측자기인덕턴스	$L_p$	10.89uH
	2차측자기인덕턴스	$L_s$	317.4uH
	순방향 등가누설인덕턴스	$L_{eq,F}$	46.17uH
	역방향 등가누설인덕턴스	$L_{eq,R}$	48.82uH
	권선비( $N_p/N_s$ )		0.19(4T/21T)
사용된 소자	보조인덕터	$L_A$	344uH
	공진커패시터	$C_s$	43nF
	1차측 스위칭소자	$Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$	IRFP4468(100V/190A)
	2차측 스위칭소자	$Q_5, Q_6$	SPW47N60CFD(600V/46A)
	2차측 정류다이오드	$D_7, D_8$	DSEP30-06A(600V/30A)

그림 6은 순방향 동작시 1차측 입력전압( $V_{in}$ ) 41V<sub>dc</sub>와 60V<sub>dc</sub>일 때 측정된 파형이다. 그리고 그림 7은 역방향 동작시 2차측 입력전압( $V_{in}$ )은 400V<sub>dc</sub>이고 1차측 출력전압( $V_o$ )가 41V<sub>dc</sub>와 60V<sub>dc</sub>일 때 측정된 파형이다. 순방향 및 역방향 동작시 LLC 공진이득특성을 가지고 동작하는 것을 확인할 수 있다.

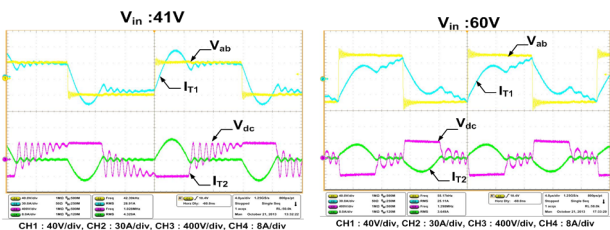


그림 6 순방향 동작모드

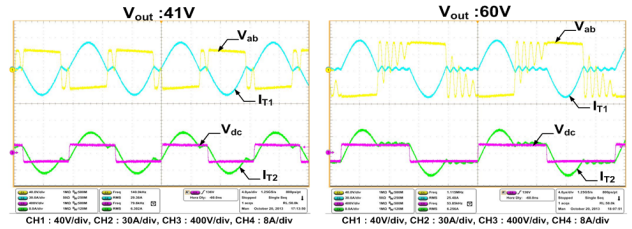


그림 7 역방향 동작모드

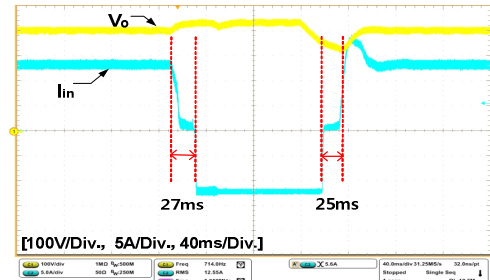


그림 8. 양방향 컨버터의 양방향 동작전환 시 동 특성

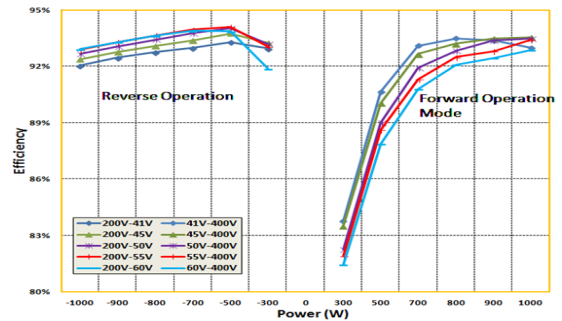


그림 9. 순방향 및 역방향 효율특성

그림 8은 양방향 동작모드전환 시 동특성 실험파형이다. 순방향에서 역방향 동작시 27ms의 시간이 소요되고 역방향에서 순방향 동작시 25ms의 변환시간이 소요되었다.

그림 9는 순방향 및 역방향 동작 시의 효율특성을 나타낸다. 순방향 동작에서 최소효율은 300W에서 83.5%, 최대효율은 1kW에서 93.5%정도로 측정되었고, 역방향 동작 시의 최소효율은 300W에서 91.8%, 최대효율은 500W에서 93.7%정도로 측정되었다. 본 논문에서는 2차측에 보조스위치와 보조인덕터를 적용하여 순방향 및 역방향 동작 시 LLC 공진이득특성을 갖는 양방향 SLLC 공진컨버터를 제안하였고, 1kW급 시제품 제작 및 실험을 통해 적용 가능성을 검증하였다.

이 논문은 카코뉴에너지(주) 산학협력  
연구과제 지원으로 수행되었음

## 참고 문헌

- [1] W. Chen, P. Rong, and Z. Lu, "Snubberless bidirectional dc-dc converter with new clc resonant tank featuring minimized switching loss," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.57, no.9, pp.3075 - 3086, 2010.
- [2] Eun-Soo Kim, Jun-Hyoung Park, Yong-Seog Jeon, Young-Su Kong, Seung-Min Lee, Kwang-Seob Kim, "Bidirectional Secondary LLC Resonant Converter using Auxiliary Switches and Inductor", 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference, pp.1941-1947, March 2014
- [3] 김은수 외, "2013년도 전주대-카코뉴에너지(주) 산학과제 결과보고서", 2013.10