

# 보조스위치와 보조인덕터 적용 양방향 SLLC 공진컨버터

공영수<sup>1</sup>, 노영재<sup>2</sup>, 박준형<sup>2</sup>, 권주일<sup>2</sup>, 김은수<sup>2\*</sup>, 김광섭<sup>3</sup>, 김경환<sup>3</sup>  
 국립과학수사연구원<sup>1</sup>, 전주대학교<sup>2</sup>, 카코뉴에너지(주)<sup>3</sup>

## Bidirectional SLLC Resonant Converter using Auxiliary Switches and Inductor

Y.S Kong<sup>1</sup>, Y.J Noh<sup>2</sup>, J.H Park<sup>2</sup>, J.I Kwon<sup>2</sup>, E.S Kim<sup>2\*</sup>, K.S Kim<sup>3</sup>, K.H Kim<sup>3</sup>  
 National Forensic Service<sup>1</sup>, JeonJu University<sup>2</sup>, KACO new energy Inc.<sup>3</sup>

### 1. 서론

최근 신재생에너지 및 스마트그리드 관련하여 배터리 충·방전 시스템을 위한 양방향 DC/DC 컨버터에 대한 연구가 진행되고 있으며, 크기 및 스위칭 손실, EMI(Electro Magnetic Interference) 저감을 위한 소프트스위칭 LLC 공진컨버터가 접목된 양방향 DC/DC 컨버터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>[1]</sup> 그림 1과 같은 기존 CLLC 공진컨버터를 적용한 양방향 DC/DC 컨버터는 양방향 전력전달을 위해 1차측 및 2차측에 각각의 공진커패시터( $C_{r1}$ ,  $C_{r2}$ (또는  $C_{BI}$ ))를 적용하였으며, 이러한 경우, 두 커패시터 값에 의해 순방향 및 역방향 전력전달 동작 시, 그림 2에서와 같이 기존 LLC 공진컨버터 이득특성과는 다른 공진특성을 갖게 되어 양방향 전력전달에 있어서 어려움이 있다.<sup>[2]</sup> 따라서 본 논문에서는 그림 3과 같이 높은 전압단인 변압기 2차측에 보조인덕터와 보조스위치를 적용한 SLLC(Secondary Inductor Inductor Capacitor) 양방향 DC/DC 컨버터를 제안하였고<sup>[3,4]</sup>, 순방향 및 역방향 동작시 이득특성 분석과 1kW 출력용량의 시제제작과 실험을 통해 회로의 적용가능성을 검증하였다.

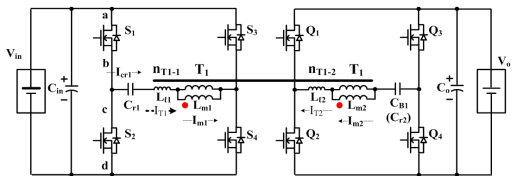
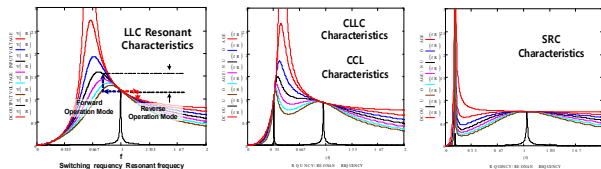


그림 1. CLLC 양방향 DC/DC 컨버터



(a) LLC 이득특성 (b) CLLC 이득특성 (c) CCL 이득특성 (d) SRC 이득특성

그림 2 공진커패시터 값에 따른 양방향컨버터의 이득특성변화

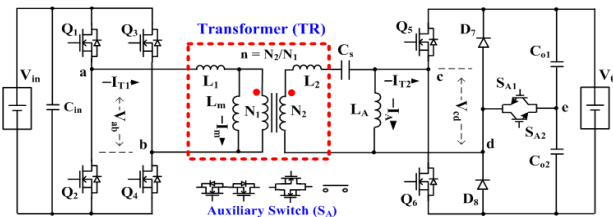


그림 3. 제안된 보조인덕터 및 보조스위칭 적용 양방향 SLLC 컨버터

### 2. 제안된 SLLC 양방향 DC/DC 컨버터

제안된 SLLC 양방향 DC/DC 컨버터는 변압기(TR) 2차측에 보조인덕터( $L_A$ )와 보조스위칭소자( $S_{A1}, S_{A2}$ )를 적용하였고, 이러한 경우 순방향 전력전달 동작시에는 2차측누설인덕턴스( $L_2$ )와 공진커패시터( $C_s$ ), 2차측보조인덕터( $L_A$ )와의 공진특성을 이용하여 LLC 공진특성이 나타나도록 하였고, 역방향 전력전달 동작시에는 1차측누설인덕턴스( $L_1$ ), 2차측누설인덕턴스( $L_2$ )와 공진커패시터( $C_s$ ), 변압기자화인덕턴스( $L_m$ )와의 공진특성을 이용하여 LLC공진특성이 나타나도록 회로를 구성하였다.

#### 2.1 순방향 동작

그림 4에서 볼 수 있는 것처럼, 변압기(TR) 1차측의 낮은 전압단에서 2차측의 높은 전압단으로의 순방향 전력전달은 1차측의 스위칭소자( $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$ )가 각각 고정된 듀티비 50%로 온/오프(On/Off) 스위칭 동작을 하며, 2차측의 양방향 보조스위칭소자( $S_{A3}, S_{A4}$ )는 오프(Off) 상태이고, 2차측 스위칭소자( $Q_5, Q_6$ )도 오프(Off) 상태이기 때문에, 2차측 스위칭소자( $Q_5, Q_6$ )의 역병렬다이오드와 다이오드( $D_7, D_8$ )로 구성된 전파정류회로를 통해 2차측 공진전류( $I_{T2}$ )가 흐르면서 전력이 전달된다.

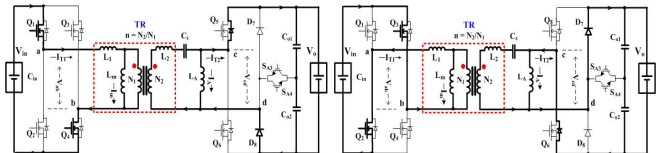


그림 4 순방향 동작모드

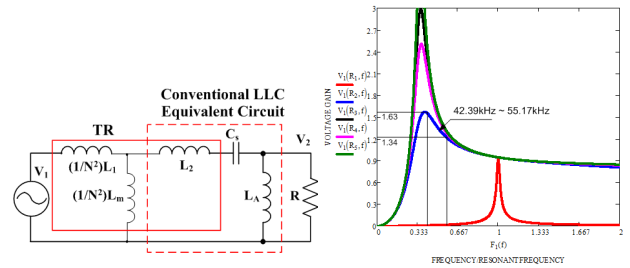


그림 5 순방향모드 등가회로

그림 6 순방향모드 이득특성

$$V_{GF} = \left| \frac{1}{1 + \frac{L_1}{L_m} + \left(1 + \frac{L_1}{L_m}\right) \frac{L_{eq}}{L_A} \left(1 - \frac{1}{w^2 L_{eq} C_s}\right) + j \frac{1}{R} \left(1 + \frac{L_1}{L_m}\right) \left(w L_{eq} - \frac{1}{w C_s}\right)} \right| \quad (1)$$

그림 5는 제안된 양방향 SLLC 공진컨버터 순방향동작시 2차측에서 바라본 등가회로도이고, 변압기 1차측누설인덕턴스

$[(1/N^2)L_1]$ 와 자화인덕턴스 $[(1/N^2)L_m]$ 를 제외한 변압기 2차측 누설인덕턴스( $L_2$ )와 공진커패시터( $C_s$ ), 2차측보조인덕터( $L_A$ )가 기존 LLC 공진등가회로와 같이 표현됨을 볼 수 있다. 이에 대한 순방향동작모드의 전압이득특성식( $G_{VF}$ )은 식(1)과 같다. 그림 6은 그림 5와 식(1)을 토대로 시뮬레이션된 전압이득특성( $G_{VF}$ )을 보여준다. 시뮬레이션 결과를 토대로 순방향 및 역방향 동작 시 이득특성 개선을 위해 먼저 순방향 동작 시 가장 높은 입력전압 조건에서 공진주파수 부근에서 스위칭동작을 하여 일정 2차측단 전압( $V_o$ )을 제어되도록 이득특성을 설정하였고, 역방향동작모드 시 가능한 공진주파수 부근에서 스위칭동작하도록 변압기 턴수비(Turn ratio) 및 전압이득을 설정하였다.

## 2.2 역방향 동작 시

그림 7에서 볼 수 있는 것처럼, 2차측의 높은 전압단에서 1차측의 낮은 전압단으로의 역방향 전력전달 동작은 2차측의 스위칭소자( $Q_5, Q_6$ )는 각각 고정된 듀티비 50%를 가지고 턴 온/오프 스위칭 동작되고, 출력커패시터( $C_{o1}, C_{o2}$ ) 중간과 다이오드( $D_7, D_8$ ) 중간 사이에 연결되어 있는 2차측 양방향 보조스위칭소자( $S_{A3}, S_{A4}$ )가 턴 온 상태로 연결되어 있어 반파공진회로처럼 스위칭 동작된다. 따라서 출력커패시터( $C_{o1}, C_{o2}$ )의 분압된 전압 $[(1/2)V_o]$ 이 변압기(TR) 2차측과 직렬연결된 공진커패시터( $C_s$ )에 인가되어 공진전류가 흐르고, 이와 병렬로 연결된 2차측 보조인덕터( $L_A$ )에도 전류가 흐르지만 분압된 전압이 인가됨에 따라 보조인덕터 전류( $I_A$ )가 1/2만큼 저감되어 흐른다. 역방향 전력전달 동작 시 1차측의 스위칭소자( $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$ )는 오프(Off) 상태로 유지되어 있어 스위칭소자( $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$ )의 역병렬다이오드를 통해 공진전류( $I_{T1}$ )가 흐르면서 전력을 전달한다.

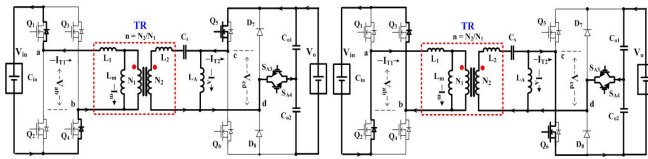


그림 7 역방향 동작모드

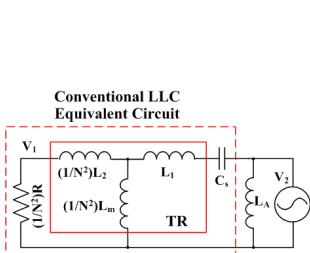


그림 8 역방향모드 등가회로

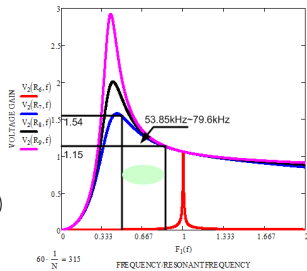


그림 9 역방향모드 이득특성

$$G_{VR} = \left| \frac{1}{1 + N^2 \left( \frac{L_1}{L_m} - \frac{1}{\omega^2 L_m C_s} \right) + \frac{N^2}{R} \left( 1 + \frac{L_2}{L_m} \right) \left( j\omega L_{eq} - j \frac{1}{\omega C_s} \right)} \right| \quad (2)$$

그림 8은 역방향동작시 2차측에서 바라본 등가회로이고, 기존 LLC공진등가회로에서 보조인덕터( $L_A$ )가 포함된 등가회로도이다. 여기서 보조인덕터( $L_A$ )는 전체적인 LLC 공진이득특성에 영향을 주지 않고 순환전류( $I_A$ )만이 흐르므로 도통손실을 증가시키는 요인이지만 인가된 전압이 순방향동작에 비해  $(1/2)V_o$  전압이므로 큰 도통손실을 일으키진 않는다. 그림 9는 역방향 동작시 그림 8과 식(2)를 토대로 전압이득특성( $G_{VR}$ )을 시뮬레이션 한 결과이다. 보조스위칭( $S_A$ ) 동작에 따라 이득특성이 저감됨으로 낮은 전압부터 높은 전압까지 이득제어 할 수 있다.

## 3. 실험결과

본 논문에서는 1kW 정격출력용량을 갖는 SLLC 양방향 DC/DC 컨버터를 제작하여 실험하였으며, 그림 10은 입력전압( $V_{in}$ )이 41V<sub>DC</sub>, 60V<sub>DC</sub>에서 출력용량 1kW 조건에서의 순방향 시 실험파형이고, 그림 11은 출력전압( $V_o$ )이 400V<sub>DC</sub>에서 출력용량이 1kW 조건에서의 역방향 동작시 실험파형으로서, 기존 LLC 공진컨버터의 특성과 같이 높은 전압이득을 갖는 동작특성을 확인하였다.

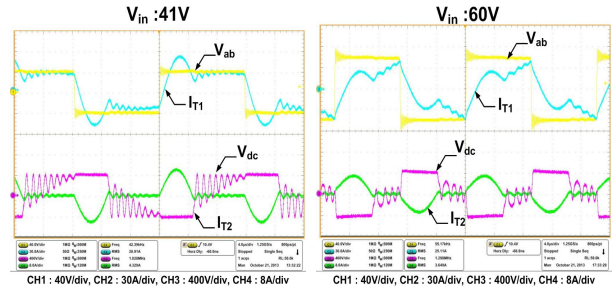


그림 10 입력전압 40V<sub>DC</sub> 및 60V<sub>DC</sub>에서의 실험파형

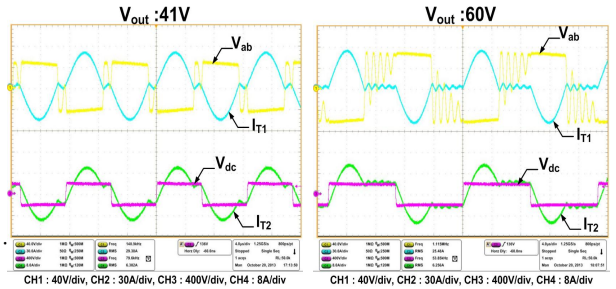


그림 11 입력전압 400V<sub>DC</sub>에서의 실험파형

순방향 전력전달 동작시 효율특성은 공극이 큰 변압기 적용에 따라 큰 자화전류( $I_m$ )와 2차측보조인덕터에 흐르는 전류( $I_A$ )로 인해 92.87%~93.54% 정도의 효율특성을 보여주고 있고, 역방향 전력전달 동작시 효율특성은 2차측보조인덕터( $L_A$ )에 인가되는 전압이 출력전압( $V_o$ )의 1/2이 인가되어 순방향 전력전달 동작시 보다 적게 흐르지만 1차측단의 큰 공진전류가 스위칭소자의 역병렬다이오드( $V_F=1.3V$ )를 통해 정류되어 동작되므로 도통손실이 증가하여 92.05%~92.93% 정도로 효율특성을 보여주었다. 향후 최적 스위칭소자 선정 및 동기정류기(Synchronous Rectifier) 적용을 통해 효율을 개선하고자 한다.

이 논문은 카코뉴에너지(주) 산학협력연구과제 지원으로 수행되었음.

## 참고 문헌

- [1] F. Krismer, J. Biela, J. W. Kolar, "A Comparative Evaluation of Isolated Bi directional DC/DC Converters with Wide Input and Output Voltage Range", IEEE IAS 2005, pp.599-606.
- [2] Wei Chen, Ping Rong, and Zhengyu Lu, "Snubberless Bidirectional DC DC Converter With New CLLC Resonant Tank Featuring Minimized Switching Loss", IEEE Trans. Ind. Electron. vol. 57, No. 9, September 2010, pp.3075-3086.
- [3] 김은수, 김경환, "양방향 전력수수를 위한 SLLC 공진컨버터", 특허출원(10 2012 0133728)
- [4] 김은수, 김경환 "보조스위칭과 인덕터 적용 양방향 전력수수를 위한 SLLC 공진컨버터", 특허출원 10 2013 0122489, 2013. 10.