

# 양방향 전력수수가 가능한 SLLC 공진컨버터

박준형<sup>1</sup>, 최용욱<sup>1</sup>, 한동필<sup>1</sup>, 김은수<sup>1†</sup>, 김광섭<sup>2</sup>, 김경환<sup>2</sup>, 공영수<sup>3</sup>  
 전주대학교\*, 카코 뉴에너지\*, 국립과학수사연구원\*

## SLLC Resonant Converter for Bidirectional Power Conversion

J.H Park<sup>1</sup>, Y.U Choi<sup>1</sup>, D.P Han<sup>1</sup>, E.S Kim<sup>1†</sup>, K.S Kim<sup>2</sup>, K.H Kim<sup>2</sup>, Y.S Kong<sup>3</sup>  
 JeonJu University<sup>1</sup>, KACO new energy Inc.<sup>2</sup>, National Forensic Service<sup>3</sup>

### 1. 서론

최근 축전지 충·방전 시스템, 전기자동차, 태양광발전 계통 연계 시스템 등 소프트 스위칭 LLC 공진 컨버터가 주목되어 개발되고 있다. LLC 공진컨버터는 영전압스위칭(ZVS: Zero Voltage Switching)과 영전류스위칭(ZCS: Zero Current Switching) 동작이 가능하며 공진주파수점( $f_s/f_r = f_n = 1$ )을 기준으로 승·강압제어가 가능한 컨버터로 스위칭 주파수의 제어를 통해 주어진 입력전압 제어범위 및 부하범위에 대해서 제어가 가능하다. 기존 양방향 DC DC 컨버터의 경우, 효율증대를 위해 공진 및 준공진, CLLC 공진회로를 이용한 양방향 DC DC 컨버터가 최근 연구들이 이루어지고 있지만 1차측 및 2차측 공진커패시터 값( $C_{r1}$ ,  $C_{r2}$ (또는  $C_{B1}$ ))에 따라 양방향 전력전달에 있어 LLC, CLLC 이득특성 및 SRC 이득특성을 갖게되어 순방향 및 역방향 전력전달시 요구된 전압이득 제어의 어려움이 따르고, Buck Boost 컨버터 등 하드 스위칭 컨버터를 이용해야 함으로 스위칭 손실이 증대하여 고집적화를 위한 스위칭주파수를 증가시키는데 한계가 있다.<sup>[1,2]</sup>

본 논문에서는 소프트스위칭 양방향 SLLC 공진컨버터의 이득 특성 개선에 관한 내용으로 최대 1kW로 실험하였고, DSP (Microchip 16bit dsPIC33F)를 이용해 제어 구동하였다.

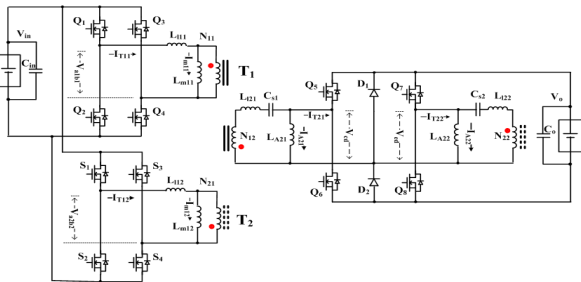


그림 1. 제안된 양방향 전력수수가 가능한 SLLC 공진컨버터 [3]

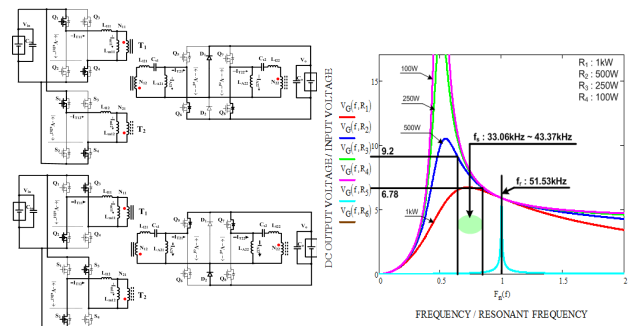
### 2. 제안된 양방향 전력수수가 가능한 SLLC 공진컨버터

제안된 양방향 SLLC 공진컨버터의 경우 그림 1에 나타낸 바와 같이 순방향 동작시 병렬로 연결된 보조인덕터( $L_{A21}, L_{A22}$ )를 이용하여 SLLC 공진이득특성을 이용하였고, 역방향 동작시에는 공극(Gap)에 따라 1차측 변압기 자화인덕턴스( $L_{m11}, L_{m12}$ )를 이용하여 LLC 공진특성을 갖도록 하여 이득특성을 개선하였다.

#### 2.1 순방향 동작

제안된 양방향 SLLC 공진컨버터는 순방향 동작 시 그림 2(a)와 같이 1차측 스위칭소자( $Q_1, Q_4, Q_3, Q_2$ )와 ( $S_1, S_4, S_3, S_2$ )는 각각 고정된 듀티비(50%)로 턴 온/오프 동작되고, 2차측 스위칭소자( $Q_5, Q_8, Q_7, Q_6$ )는 턴 오프되어 역병렬 다이오드로 동작한다. 적용된 회로에 있어서 변압기는 역방향 동작시의 이득 특성 개선을 위해서 공극(Gap)이 상당히 크므로, 순환전류의 크기가 증가하지만, 1차측은 병렬 운전 동작되기 때문에 순방향 동작시

각각의 변압기( $T_1, T_2$ )에 1/2의 전류가 흐르므로, 순환전류 증가에 대응 할 수 있는 회로이다. 또한 넓은 입력전압변화에 따른 이득특성에도 대응할 수 있는 회로이다.



(a) 순방향 동작 모드 (b) 순방향 LLC 공진 이득 특성

그림 2. 순방향 동작 및 이득 특성

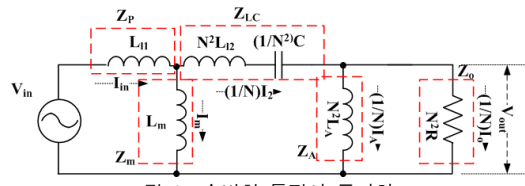


그림 3. 순방향 동작시 등가회로

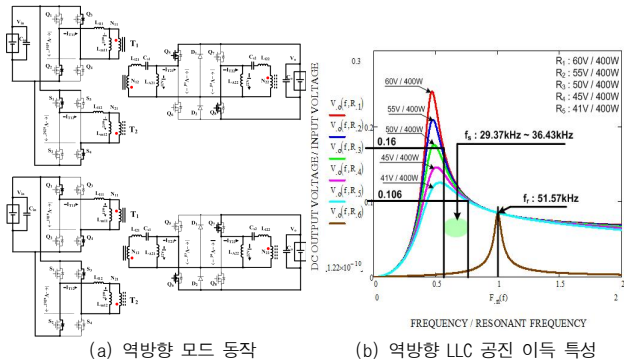
$$G_{VF} = \frac{1}{N} \cdot \left| \frac{1}{1 + \frac{L_{l1}}{L_m} + \left(1 + \frac{L_{l1}}{L_m}\right) \frac{L_{eq}}{L_A} \left(1 - \frac{1}{\omega^2 L_{eq} C}\right) + j \frac{1}{R} \left(1 + \frac{L_{l1}}{L_m}\right) \left(\omega L_{eq} - \frac{1}{\omega C}\right)} \right| \quad (1)$$

또한 그림 3은 제안된 양방향 공진 컨버터의 순방향 동작시 1차측에서 바라본 등가회로이고, 각각의 파라미터 역시 1차측으로 반영하여 나타내었다. 그림 3의 등가회로를 살펴보면, 변압기 1, 2차측의 누설인덕턴스 ( $L_{l1}$ ,  $N^2 L_{l2}$ )와 공진커패시터  $(1/N^2)C$ , 2차측 보조인덕터  $(1/N^2)L_A$ 를 통해 기존 LLC 공진 등가회로와 같이 표현되는 것을 볼 수 있으며 이에 대한 순방향 동작시 전압이득 특성식( $G_{VF}$ )은 식(1)과 같고, 전압이득 특성 시뮬레이션 결과는 그림 2(b)에 나타내었다. 순방향 동작시 가장 높은 입력전압조건( $V_{in}$ ) 및 공진점에 가까운 주파수대역에서 스위칭 동작되어 일정 출력전압( $V_o$ ) 제어되도록 변압기를 설계하였다.

#### 2.2 역방향 동작

제안된 양방향 SLLC 공진컨버터 역방향 동작은, 그림 4(a)와 같이 2차측 스위칭소자( $Q_5, Q_8, Q_7, Q_6$ )는 고정된 듀티비(50%)로 턴 온/오프 동작되고, 1차측 스위칭소자( $Q_1, Q_4, Q_3, Q_2$ )와 ( $S_1, S_4, S_3, S_2$ )는 턴 오프 상태로 유지되어 역병렬다이오드를 통해 정류된다. 2차측 스위칭소자( $Q_5, Q_8, Q_7, Q_6$ )의 동작에 의해 2차측공진

커패시터( $C_{S1}, C_{S2}$ ) 및 변압기 누설인덕턴스와 자화인덕턴스( $L_{m3}, L_{m4}$ )로 구성된 공진부와 병렬로 연결되어 있는 보조인덕터( $L_{A21}, L_{A22}$ )에 전압이 인가되어 공진전류가 흐른다. 이때 변압기 공극(Gap)에 따른 저장된 자화인덕턴스( $L_{m3}, L_{m4}$ )를 통해 흐르는 자화전류에 의해 LLC 공진과 같은 높은 전압이득특성을 얻을 수 있다. 보조인덕터( $L_{A21}, L_{A22}$ )에는 전압 이득에 영향을 주지 않고, 순환전류만 흐르지만, 역방향 동작시 직렬 연결되기 때문에 보조인덕터( $L_{A21}, L_{A22}$ )에 흐르는 전류는 순방향동작시에 비해 적게 흘러 효율 특성에 큰 영향을 끼치지 않는다. 또한 역방향동작시 각각의 공진부는 직렬 연결됨으로 변압기의 자화인덕턴스( $L_{m3}, L_{m4}$ )를 통해 흐르는 순환전류는 순방향동작 때의 순환전류에 비해 1/2 저장된다.



(a) 역방향 모드 동작 (b) 역방향 LLC 공진 이득 특성  
 그림 4. 역방향 동작 및 이득특성

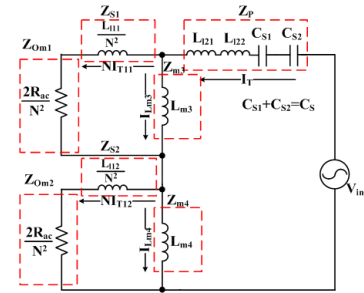


그림 5. 역방향 동작시 등가회로

$$V_{GR} = \frac{1}{N^2} \left| \frac{2R_{ac} + j\omega L_{111}}{\left( \frac{1}{j\omega C_2} + j\omega L_{m3} \left( B_1 + \frac{A_1 + C_1}{1 + A_1 + C_1} \right) + j\omega L_{m4} \left( B_2 + \frac{A_2 + C_2}{1 + A_2 + C_2} \right) \right)} \right| \times (A_1 + C_1 + 1) \quad (2)$$

$$A_1 = \left( \frac{1}{N^2} \right) \frac{L_{111}}{L_{m3}}, \quad B_1 = \frac{L_{21}}{L_{m3}}, \quad C_1 = \left( \frac{1}{N^2} \right) \frac{2R_{ac}}{j\omega L_{m3}}$$

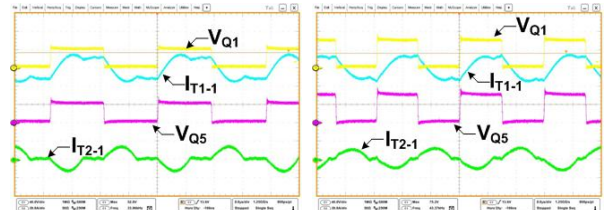
$$A_2 = \left( \frac{1}{N^2} \right) \frac{L_{112}}{L_{m4}}, \quad B_2 = \frac{L_{22}}{L_{m4}}, \quad C_2 = \left( \frac{1}{N^2} \right) \frac{2R_{ac}}{j\omega L_{m4}}$$

또한 그림 5는 제안된 양방향 SLIC 공진컨버터의 2차측에서 바라본 등가회로이고, 변압기 1차측의 파라미터는 직렬 연결된 각 변압기의 자화인덕턴스( $L_{m3}, L_{m4}$ )와 병렬 연결하여 나타내었다. 위의 등가회로에 대한 이득특성식( $G_{VR}$ )은 식(2)이고, 이에 대한 전압이득 특성에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 4(b)에 나타내었다.

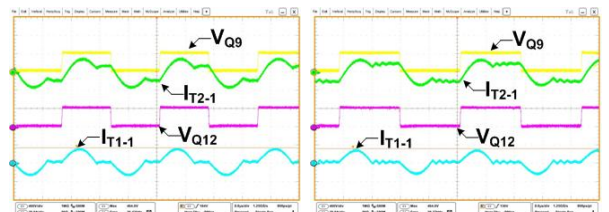
### 3. 실험결과

본 논문에서는 제안된 양방향 SLIC 공진컨버터에 대해 1kW 급 출력용량으로 실험 적용하였다. 순방향 동작 시에는 입력전압( $V_{in}$ ) 41V~60V 조건에서 최대정격출력용량 400V/2.5A로 1kW에 대해 실험하였고, 역방향 모드 시에는 높은 전압단 출력전압( $V_o$ ) 400V조건에서 정격출력용량 41V~60V/13.3A~19.5A로 800W에 대해 각각 실험하였다.

그림 6은 제안된 양방향 전력수수가 가능한 SLIC 공진컨버터 순방향동작시 실험파형으로, 입력전압( $V_{in}$ ) 41V~60V 각각의 조건에서 출력전압( $V_o$ ) 400V/2.5A 1kW일 때의 실험 파형이다. 주 스위칭 소자 전압( $Q_1, Q_5$ ), 단자전류( $I_{T21}, I_{T22}$ )를 측정 한 파형으로, 전체적인 동작은 불연속 모드에서 동작하는 것을 알 수 있고, 그림2(b)의 순방향 전압이득특성과 같은 것을 확인할 수 있다. 그림 7은 출력전압( $V_o$ ) 400V 조건에서 입력전압( $V_{in}$ ) 41V~60V / 13.3A~19.5A 800W일 때, 주 스위칭소자 전압( $Q_9, Q_{12}$ )과 공진전류( $I_{T22}, I_{T21}$ )를 측정 한 파형으로 그림 4(b)의 전압이득 특성과 같은 것을 확인할 수 있다.



(a)  $V_{in}:41V, V_o:400V, I_o:2.5A, 8\mu s/Div$  (b)  $V_{in}:60V, V_o:400V, I_o:2.5A, 8\mu s/Div$   
 그림 6. 순방향 동작시 실험파형 (1kW)



(a)  $V_o:400V, V_{in}:41V, I_{in}:19.5A, 8\mu s/Div$  (b)  $V_{in}:400V, V_{in}:60V, I_{in}:13.3A, 8\mu s/Div$   
 그림 7. 역방향 동작시 실험파형 (800W)

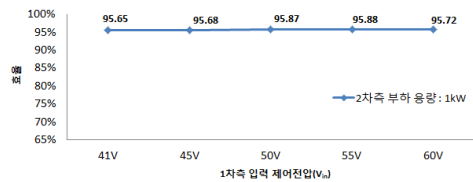


그림 8. 순방향동작시 전압( $V_{in}$ )과 각 부하별 효율

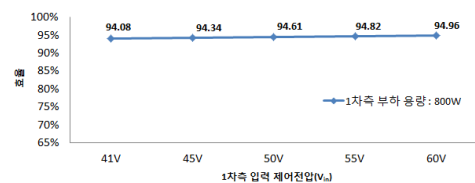


그림 9. 역방향동작시 전압( $V_o$ )과 각 부하별 효율

그림 8과 그림 9는 제안된 양방향 SLIC 공진컨버터의 입력전압( $V_{in}$ )범위에 따른 효율측정 값으로, 순방향 동작 시 입력전압 55V에서 최대부하(1kW)일 때 95.88% 효율이 측정되었고 역방향 동작 시 출력전압 60V에서 최대부하(800W)일 때 94.96%의 효율 특성을 보여주었다.

이 논문은 카코뉴에너지(주) 산학협력연구과제 지원으로 수행되었음.

### 참고 문헌

- [1] 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.
- [2] 채형준, 이윤재, 윤수영, 오은테, 유광민, 이준영 "Unregulated BUS converter를 사용한 3kW급 에너지 저장용 양방향 컨버터" 전력전자학회논문집 2009.7, pp408~410
- [3] 김은수, 김경환 "양방향 전력수수를 위한 SLIC 공진컨버터", 특허출원 (10-2012-0133728)
- [4] 김은수, 김경환 "보조인덕터 적용 양방향 전력수수를 위한 SLIC 공진컨버터", 특허출원 10-2013-0122490, 2013. 10.