

2차 측 LCLC 공진 탱크를 적용한 넓은 입력전압범위에서 동작 가능한 고승압 DC-DC 컨버터

송영준, 김상오, 장현준, 한병철
경북대학교 전자전기공학부

A Wide-Input Range with High Step-Up DC-DC Converter using Secondary-Side LCLC Resonant Tank.

Youngjoon Song, Sangoh Kim, Hyeonjun Jang, Byeongcheol Han

School of Electronic and Electrical Engineering, Kyungpook National University, Daegu, Korea

ABSTRACT

기존의 LLC 공진형 컨버터는 고효율, 높은 전력밀도, 낮은 EMI 및 소프트 스위칭으로 인하여 많은 주목을 받고 있다. 하지만, LLC 공진형 컨버터는 고승압 목적으로 사용하기에는 여러 제한이 있다. 제안한 논문에서는 2차 측 LCLC 공진 탱크를 사용한 넓은 입력전압에서 동작 가능한 고승압 DC-DC 컨버터를 제안한다. 제안된 컨버터는 기존 LLC, LCLC 컨버터와는 다르게 2차 측에 공진 탱크를 배치함에 따라 공진 탱크에서 전류 스트레스를 줄일 수 있으며 낮은 도통 손실이 일어난다. 또한, 1차 측 스위치는 영전압 스위칭 턴 온이 가능하다. 본 논문에서는 스위칭 주파수 변조 기법을 사용한 35~60V 입력 전압, 380V 출력 전압을 가진 300W급 DC-DC 공진형 컨버터를 제안하며, PSIM 시뮬레이션을 수행하여 타당성을 검증한다.

1. 서 론

UPS(Uninterruptible Power Supply)는 전력 공급의 중단이 발생할 경우 부하에 대한 전원 공급을 계속 유지해 준다. 모듈러 UPS는 여러 개의 소형 UPS를 병합하여 사용하므로 높은 신뢰성을 가지고 있다^[1]. UPS는 전력망에서 전력 공급 중단 시, 배터리에서 대신 전력공급을 맡게 된다. 다만, 안정성을 위하여 배터리를 병렬로 연결 시 높은 승압비를 요구한다^[2]. 이러한 조건을 만족시키기 위해서는 넓은 입력 전압 범위에서 고효율 특성을 가진 고승압 DC-DC 컨버터가 필요하다.

플라이백 컨버터는 고승압 DC-DC 컨버터에 많이 사용되는 토폴로지 중 하나다. 플라이백 컨버터는 구조가 단순하며 절연 및 가격이 저렴하다는 장점이 있지만, 누설 인덕턴스로 인한 전압 스파이크 및 하드 스위칭으로 인하여 효율이 낮아지는 단점이 있다. LLC 공진형 컨버터는 소프트 스위칭으로 인해 고효율을 달성할 수 있어 DC-DC 컨버터에서 많은 주목을 받고 있다^[3]. 다만, LLC 공진형 컨버터는 주로 감압 용도로 사용되며, 승압 목적으로 사용 시 커패시터에 높은 전류 스트레스, 낮은 효율 등 여러 문제점이 있다^[4].

본 논문에서는 넓은 입력 전압 범위에서 동작하는 LCLC 공진형 DC-DC 컨버터를 제안한다. 1차 측의 경우 push-pull 구조로 스위치 2개만을 사용하여 구성하였으며, 2차 측은 LCLC 공진 탱크 및 배전압 회로를 배치하여 공진 소자들의 전류 스트레스를 줄이며, 스위칭 주파수에 따른 승압이 가능하게 설계되었다. 또한, LLC 공진형 컨버터와 같이 1차 측

스위치는 영전압 스위칭(Zero-voltage switching, ZVS) 턴 온이 가능하다. 제안된 컨버터는 FHA(First Harmonic approximation) 기법을 사용하여 분석하였다.

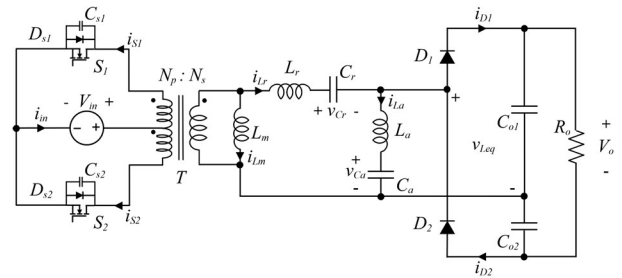


그림 1 제안된 2차 측 LCLC 공진 탱크를 이용한 공진형 DC-DC 컨버터
Fig.1 Proposed resonant dc-dc converter using secondary-side LCLC resonant tank

2. 제안 회로의 기본 동작

2.1 제안된 회로 구성

본 논문에서 제안한 2차 측 LCLC 공진 탱크 회로를 지닌 공진형 DC-DC 컨버터를 그림 1에 나타낸다. 제안된 컨버터는 1차 측 스위치 S_1 , S_2 ; 권선비가 $N_p:N_s$; 변압기 T ; 정류 다이오드 D_1 , D_2 ; 공진 인덕터 L_r ; 공진 커패시터 C_r ; 보조 인덕터 L_a ; 보조 커패시터 C_a 로 구성된다.

2.2 제안된 회로 동작 원리

1차 측 스위치 S_1 , S_2 는 0.5 고정 듀티를 가지며, 상보로 동작한다. 스위칭 주파수를 공진 주파수보다 낮게 설정함으로써 전압이득은 항상 1보다 같거나 크다. 스위칭 주파수 조절을 통해 원하는 전압이득을 가질 수 있다. LCLC 공진형 컨버터는 FHA 분석 시 L_a , C_a 를 하나의 등가 인덕턴스인 L_{eq} 로 볼 수 있으며 수식은 다음과 같다.

$$L_{eq}(w_s) = L_a - \frac{1}{w_s^2 * C_a} \quad (1)$$

여기서 $w_s = 2\pi f_s$ 이며, f_s 는 스위칭 주파수다.

그림 2는 스위칭 주파수에 따라 달라지는 등가 인덕턴스의 값을 보여주며, 그림 3은 제안된 컨버터의 동작 그래프를 보여준다. 제안된 회로는 대칭 구조로 동작하므로 양의 반주기에서만 모드 설명을 한다.

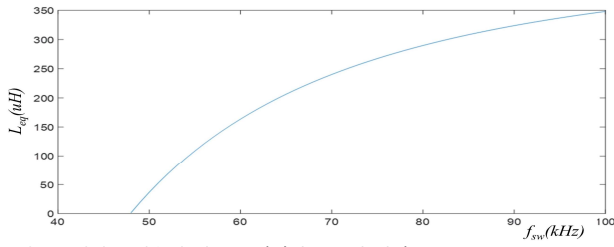


그림 2 스위칭 주파수에 따른 등가인덕턴스 값 변화

Fig.2 Operating Waveforms of the L_{eq} changing with switching frequency

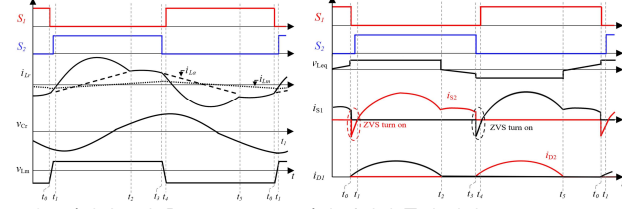


그림 3 제안된 2 차 측 LCLC DC-DC 공진형 컨버터 동작 파형

Fig.3 Operating waveforms of the proposed converter

2.3 제안된 회로 모드별 동작

모드 1 [$t_0 \sim t_1$]: 스위치 S_1 이 턴 오프 되면서, 데드 타임에 들어가게 된다. 이 구간에서 S_2 는 음전류가 흘러 소프트 스위칭을 하기 위한 조건을 가지며 D_1 이 도통되기 시작한다.

모드 2 [$t_1 \sim t_2$]: t_1 에서 S_2 는 ZVS 턴 온이 되고, L_m 에 NV_{in} 전압이 걸린다. 해당 구간에서는 L_{eq} 에 $0.5V_o$ 의 전압이 걸리며 L_r , C_r 이 공진에 참여한다. 이때 공진 주파수는 $1/\sqrt{L_r C_r}$ 이다.

모드 3 [$t_2 \sim t_3$]: t_2 에서 L_r , L_a 의 전류가 같아지면서 D_1 이 턴 오프 된다. 이 구간에서는 부하와 공진 탱크가 분리되면서, L_{eq} 가 공진에 참여하게 된다. 이에 따라 공진 주파수는 기존의 $\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}}$ 에서 $\omega_m = \frac{1}{\sqrt{(L_r + L_{eq}) C_r}}$ 로 달라진다. 해당 구간은 스위칭 주파수가 ω_r 에 가까워질수록 줄어든다.

3. 제안된 회로의 전압 이득

$M = V_o/2nV_{in}$ 은 제안된 회로의 전압 이득이다. 이는 FHA 기법을 사용 시 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$M = \frac{V_o}{2nV_{in}} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \frac{1}{k} \left(1 - \frac{1}{F^2}\right)\right)^2 + \left(Q \left(F - \frac{1}{F}\right)\right)^2}} \quad (2)$$

이 때, $k = \frac{L_{eq}}{L_r}$; $R_{ac} = \frac{2}{\pi^2} R_o$; $Q = \frac{\sqrt{L_r/C_r}}{R_{ac}}$; $F = \frac{f_s}{f_r}$ 이고, f_s 는 스위칭 주파수, f_r 은 공진 주파수다.

4. 시뮬레이션 검증

제안된 컨버터를 입력전압이 35[V], 60[V]에서 PSIM 프로그램을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 4과 그림 5는 각각 다른 입력 전압에서 공진 인덕터 전류 i_{Lr} , 공진 커패시터 전압 v_{cr} , 등가 인덕터 전압 $v_{Leq,1}$, 2차 측 스위치 전류 i_{ds1} , i_{ds2} 및 다이오드 전류 i_{Dr} 의 파형을 나타낸다.

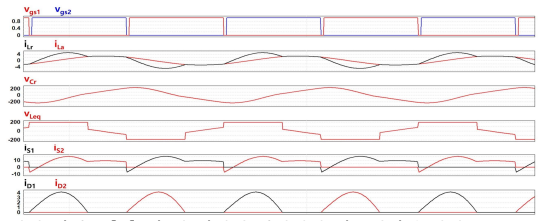


그림 4 입력 전압 35[V] 일 때 제안된 컨버터의 시뮬레이션 파형

Fig.4 PSIM simulation waveforms of the proposed converter in $V_{in}=35[V]$

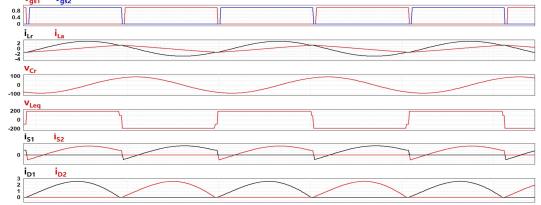


그림 5 입력 전압 60[V]일 때 제안된 컨버터의 시뮬레이션 파형

Fig.5 PSIM simulation waveforms of the proposed converter in $V_{in}=60[V]$

5. 결 론

본 논문에서는 모듈러 UPS의 고출력 DC-DC 컨버터의 역할을 하기 위한 넓은 입력 전압 범위에서 동작하는 2차 측 LCLC공진 탱크, 배전압 회로를 지닌 공진형 컨버터를 제안한다. 제안된 컨버터는 2차 측에 LCLC 공진 탱크를 배치하며 공진 탱크에 전류스트레스를 최소화하였다. 또한 배전압회로를 사용하여 변압기의 권선수를 줄일 수 있으며, 1차 측에는 push-pull 구조를 사용하여 능동 소자는 총 2개가 사용되며 ZVS 턴 온이 가능하다. 마지막으로 스위칭 주파수에 따라 등가 인덕턴스 값이 달라지므로 이를 통해 보다 넓은 전압 이득범위를 가지면서도, 정격전압에서 고효율을 달성할 수 있다. 이를 통해 최소한의 소자수를 사용하여 회로의 소형화가 가능하며 동시에 고전력밀도를 가질 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] L. Saro, C. Zanettin and V. Božič, "Reliability Analysis and Calculations for Different Power System Architectures based on Modular UPS," *2018 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, Turino, Italy, 2018, pp. 1-8
- [2] Wei Chen, Zhengyu Lu, Xiaofeng Zhang and Shaoshi Ye, "A novel ZVS step-up push-pull type isolated LLC series resonant dc-dc converter for UPS systems and its topology variations," *2008 Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Austin, TX, USA, 2008, pp. 1073-1078
- [3] Y. Chen et al., "LCLC Converter With Optimal Capacitor Utilization for Hold-Up Mode Operation," *in IEEE Trans. on Power Electron.*, vol. 34, no. 3, pp. 2385-2396, March 2019
- [4] S. Zhong, X. Wu, B. Wang, X. Zhao, X. Chen and X. Wu, "Limitations and Solutions of LLC Topology in High Power High Step-up Applications on Aircraft," *2022 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, Haining, China, 2022, pp. 1-5