

On-Board Charger용 절연형 양방향 DC-DC 컨버터 비교 분석

윤지현, 장원용, 김민우, 박정욱
연세대학교

Comparative Analysis of Isolated Bidirectional DC-DC Converter for On-Board Charger

Jihyeon Yun, Won-Yong Jang, Minwoo Kim, Jung-Wook Park
Yonsei University

ABSTRACT

본 논문에서는 on-board charger(OBC)에 이용되는 절연형 양방향 DC-DC 컨버터인 dual-active bridge(DAB) 컨버터와 *CLLC* 공진형 컨버터를 비교 분석한다. DAB 컨버터와 *CLLC* 공진형 컨버터는 소프트 스위칭 동작으로 고 주파수 DC-DC 컨버터 손실의 대부분을 차지하는 스위칭 손실을 저감 시킬 수 있다는 장점 뿐 아니라 전압 이득 곡선을 통해 zero voltage switching(ZVS) 동작 영역을 확인할 수 있다. 본 논문에서는 이를 중심으로 DAB 컨버터와 *CLLC* 공진형 컨버터의 토폴로지와 특징에 대해 알아보고, PSIM 시뮬레이션을 통해 grid-to-vehicle(G2V) 모드와 vehicle-to-grid(V2G) 모드에서 효율을 비교 분석한다.

1. 서 론

화석연료 고갈 문제와 친환경에 대한 관심이 커지면서 전기 자동차의 수요가 증가하고 있다. 또한, 안정적인 계통 운영을 위해 사용되는 energy storage system(ESS)로써 전기 자동차가 주목받으면서 vehicle-to-grid(V2G) 동작이 가능한 양방향 on-board charger(OBC)와 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다.^{[1],[2]} Zero voltage switching(ZVS) 동작을 통해 높은 효율로 양방향 동작이 가능한 OBC용 절연형 DC-DC 컨버터는 대표적으로 dual-active bridge(DAB) 컨버터와 *CLLC* 공진형 컨버터가 있으며 DAB 컨버터는 경부하에서 ZVS 동작이 불가능하고, *CLLC* 공진형 컨버터는 설계에 따라 제한된 전압 이득 범위를 갖는다는 단점이 있다.

본 논문에서는 ZVS 동작을 적용한 3.3 kW OBC용 DAB 컨버터와 *CLLC* 공진형 컨버터를 설계하고, PSIM 시뮬레이션으로 grid-to-vehicle(G2V) 모드와 V2G 모드에서 효율을 각각 비교 분석한다.

2. 이론적 분석

2.1 스위칭 제어 기법

그림 1과 그림 2는 각각 DAB 컨버터와 *CLLC* 공진형 컨버터의 회로도를 나타내며 이 때 DC 링크와 연결된 부분(C_{DC})은 1차측, 배터리와 연결된 부분(C_o)은 2차측을 의미한다. OBC용 절연형 양방향 DC-DC 컨버터는 전력 전달 방향에 따라 G2V 모드와 V2G 모드가 있고 토폴로지가 대칭으로 구성되어 전력 전달 방향이 바뀌어도 동작 특성이 동일하다는 장점이 있다.

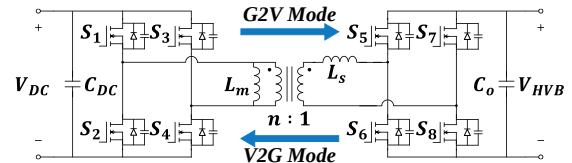


그림 1 DAB 컨버터의 토폴로지

Fig. 1 Topology of DAB converter

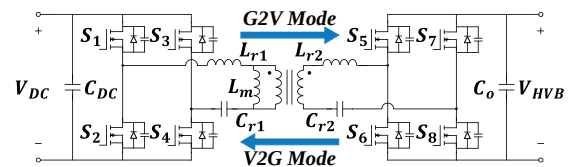


그림 2 *CLLC* 공진형 컨버터의 토폴로지

Fig. 2 Topology of *CLLC* resonant converter

그림 1에 나타난 DAB 컨버터의 고효율 양방향 동작을 위해 스위칭 신호의 위상 차를 제어하는 다양한 스위칭 방법에 대한 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 그림 1에 존재하는 스위치의 duty를 모두 50%로 고정하고 1차측과 2차측 스위칭 신호의 위상 차 D 를 이용해 전력 전달 방향과 출력 전력량을 제어하는 SPS 기법을 적용하여 컨버터가 동작하도록 설계하였다.

CLLC 공진형 컨버터는 스위치의 duty를 50%로 고정하고 스위칭 주파수를 조정하여 출력 전압을 제어하는 Pulse frequency Modulation(PFM) 기법을 이용한다. 이때 *CLLC* 공진형 컨버터에서 DC 전원은 1차측 풀 브릿지 스위치 부분을 지난 후에 구형파로 출력 되는데 분석을 간단하게 하기 위해 기본파 성분만 고려하여 분석하는 first harmonic approximation(FHA) 기법을 적용하여 컨버터를 설계하였다.

2.2 ZVS 동작 제어

ZVS 동작은 이론적으로 스위치의 turn-on 스위칭 손실을 제거하여 전체 효율을 높일 수 있는 소프트 스위칭 기법이다. DAB 컨버터는 식 (1), (2)를 만족하는 영역에서 ZVS 동작을 수행할 수 있으며, 전압 이득 비인 M_{DAB} 가 1일 때는 항상 ZVS 동작이 가능하다는 특징이 있다.

$$D \leq \frac{M_{DAB}-1}{2M_{DAB}}, \text{ if } M_{DAB} \geq 1 \quad (1)$$

$$D \geq \frac{1-M_{DAB}}{2}, \text{ if } M_{DAB} \leq 1 \quad (2)$$

CLLC 공진형 컨버터에 FHA 기법을 적용하여 얻은 등가회로를 통해 구한 G2V 모드 및 V2G 모드에서 전압 이득 비는 각각 M_{G2V} , M_{V2G} 이고 이는 스위칭 주파수, 자화 인덕턴스와 공진

인덕턴스의 비, 양호도에 대한 식으로 나타낼 수 있다. 이론적으로 $CLLC$ 공진형 컨버터의 전압 이득 비는 공진 주파수 부근에서 항상 1이며 스위칭 주파수가 식 (3)에서 나타나는 자화 인덕턴스의 공진 참여 시 공진 주파수인 f_c 이상일 때 ZVS 동작이 이루어 진다. 또한 $L_{m,CLLC}$ 은 변압기의 자화 인덕턴스, L_{r1}, L_{r2} 는 각각 1차측과 2차측의 공진 인덕턴스, C_{r1}, C_{r2} 는 각각 1차측과 2차측의 공진 캐패시턴스를 의미한다.

$$f_{ci} = \frac{1}{\sqrt{(L_{m,CLLC} + L_{ri})C_{ri}}}, \quad (i = 1, 2) \quad (3)$$

2.3 OBC용 절연형 양방향 DC-DC 컨버터 설계

본 논문에서 OBC에 사용되는 절연형 양방향 DC-DC 컨버터 성능을 확인하기 위해 3.3 kW DAB 컨버터와 $CLLC$ 공진형 컨버터를 설계한 후 PSIM 시뮬레이션을 진행하였다.

표 1은 각 컨버터의 설계 파라미터를 나타낸다. 이때 DAB 컨버터의 누설 인덕턴스인 L_s 의 값은 식 (4)를 통해 계산되며 D_{max} 는 0.5이다.

$$L_s \leq \frac{V_{DC} V_{HVB, min}}{2n f_s P_o} D_{max} (1 - D_{max}) \approx 40.9 [\mu H] \quad (4)$$

표 1 설계 사양 및 파라미터

Table 1 Design specifications and parameters

파라미터	값
DC 링크 전압 (V_{DC})	400 [V]
배터리 전압 (V_{HVB})	300~420 [V]
변압기 턴수비 (n)	10: 9
출력 캐패시턴스 (C_{DC}, C_o)	500 [μF], 500 [μF]
스위칭 모델 ($S_1 \sim S_8$)	C3M0030090K
DAB 컨버터	
스위칭 주파수 (f_s)	100 [kHz]
자화 인덕턴스 ($L_{m,DAB}$)	1 [mH]
누설 인덕턴스 (L_s)	40 [μH]
$CLLC$ 공진형 컨버터	
공진 주파수 (f_{r1}, f_{r2})	100 [kHz], 81 [kHz]
자화 인덕턴스 ($L_{m,CLLC}$)	74.8 [μH]
공진 인덕턴스 (L_{r1}, L_{r2})	18.7 [μH], 18.7 [μH]
공진 캐패시턴스 (C_{r1}, C_{r2})	135 [nF], 205.7 [nF]

식 (1), (2)에서 구한 ZVS 동작 영역 곡선은 그림 3의 파란색으로 나타나며, 표 1을 기반으로 설계한 DAB 컨버터의 부하에 따른 동작 곡선 또한 그림 3에서 확인할 수 있다.

설계한 $CLLC$ 공진형 컨버터의 전압 이득 곡선은 그림 4와 같다. 동작 주파수 범위를 G2V 모드에서 70~220 kHz, V2G 모드에서 42~165 kHz로 설계했을 때 0.2 p.u~1 p.u 부하 영역에서 주어진 전압 이득 범위를 만족한다.

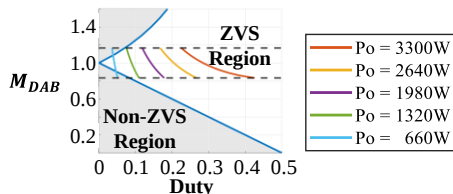


그림 3 DAB 컨버터의 ZVS 동작 영역
Fig. 3 ZVS operation Region of DAB converter

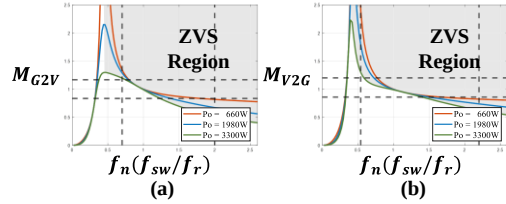


그림 4 $CLLC$ 공진형 컨버터의 전압 이득 곡선 (a) G2V 모드 (b) V2G 모드
Fig. 4 Voltage gain curves of $CLLC$ resonant converter
(a) G2V mode (b) V2G mode

3. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 논문에서는 PSIM 시뮬레이션 툴을 통해 각 DC-DC 컨버터의 효율을 분석하였다. 그림 5는 각각 정격(360 V), 강압, 승압 전압 동작 시 부하 별 효율을 나타낸다. DAB 컨버터는 모드에 상관없이 정격, 강압 동작 시 $CLLC$ 공진형 컨버터보다 대체로 높은 효율을 나타내는 반면 승압 전압 동작일 때는 상대적으로 낮은 효율을 갖는다. 또한, 두 컨버터 모두 전달 방향이 달라져도 효율에는 큰 영향을 끼치지 못하는 것을 알 수 있다.

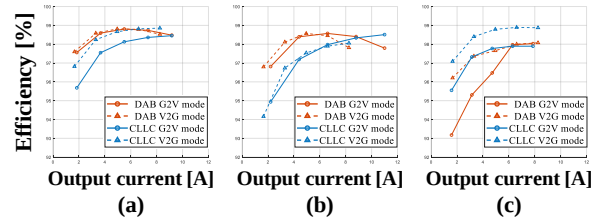


그림 5 다양한 전압 이득 동작 시 효율 비교
(a) 정격 전압 (b) 강압 전압 (c) 승압 전압

Fig. 5 Efficiency comparisons at various Voltage gain operations
(a) rated voltage (b) buck (c) boost

4. 결 론

본 논문은 on-board charger(OBC)용 절연형 양방향 DC-DC 컨버터인 dual-active bridge(DAB) 컨버터와 $CLLC$ 공진형 컨버터의 토폴로지와 특징에 대해 알아보고, PSIM 시뮬레이션을 통해 grid-to-vehicle(G2V) 모드와 vehicle-to-grid(V2G) 모드 동작 시 효율을 비교 분석해 보았다. 정격, 강압 동작 시 DAB 컨버터의 효율이 높으며, 승압 동작 시 $CLLC$ 공진형 컨버터의 효율이 높은 것을 확인하였다. 또한, 전력 전달 방향의 변화는 효율에 큰 영향을 끼치지 못하는 것으로 확인하였다.

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2020R1A3B2079407).

참 고 문 헌

- [1] N.G. Hingorani, "Power Electronics in Electric Utilities : Role of Power Electronics in Future Power System", Proceedings of the IEEE, Vol. 76, No. 4, pp. 481-482, 1988, April.
- [2] Curtis F. Gerald, Applied Numerical Analysis: Second Edition, Addison-Wesley Publishing Company, Inc. pp. 1-14, 1978.