

차량 탑재형 충전기의 고밀도화를 위한 PFC DC/DC 통합형 컨버터

정성욱¹⁾, 임지훈¹⁾, 이동인¹⁾, 현예지¹⁾, 이상윤¹⁾, 김원준¹⁾, 윤한신¹⁾
인천대학교 전기공학과¹⁾

PFC DC/DC Integrated Converter for High Density of On-Board Charger

Seong-Wook Jeong¹⁾, Ji-Hoon Lim¹⁾, Dong-In Lee¹⁾, Ye-Ji Hyeon¹⁾, Sang-Yoon Lee¹⁾,
Won-Joon Kim¹⁾, Han-Shin Youn¹⁾

Department of Electrical Engineering, Incheon National University¹⁾

ABSTRACT

현재 하이브리드, 전기 및 수소 연료전지 자동차 등 환경차 시장이 급격히 증가함에 따라, 높은 경쟁력을 확보하기 위해 친환경차의 긴 항속거리 성위와 더불어 전력시스템의 고밀도 고효율화가 필수적이다. 전기차는 항속거리 향상을 위해 탑재된 배터리 용량을 지속적으로 증가시키고 있으며, 이들 배터리를 충전하기 위한 차량탑재형 충전기 (On-Board Charger, OBC) 용량 또한 추세에 따라 증가하고 있다. 하지만, OBC는 엔진룸 또는 트렁크룸에 장착되기 때문에 OBC의 특성상 부피가 제한되어 출력 향상에 제한이 있으며, 이를 극복하기 위해 초고밀도의 OBC에 대해 집중적으로 연구 개발이 진행되고 있다. 본 연구에서는 PFC와 DC/DC 1차측을 통합한 대용량 단일 전력단 컨버터의 회로와 효율 향상을 위한 소프트 스위칭 회로에 대해 연구하였으며, 이를 통해 충전 효율 향상, 차량의 전비 향상 및 높은 전력밀도를 달성하였다.

1. 서 론

최근 전기자동차 시장이 확장됨에 따라 전기자동차의 충전을 위한 탑재형 충전기 OBC의 연구가 활발히 진행되고 있다. 차량 내 고전압 배터리를 충전하는 OBC의 경우 긴 충전 시간으로 편의성이 낮아, 이를 보완하기 위해 OBC의 출력을 지속적으로 증가시키는 방향으로 연구되고 있다. 하지만, OBC는 차량의 제한된 공간에 탑재되며, 차량의 전비와 연관된 충전 효율을 고려해야하므로 고효율, 높은 전력밀도를 달성해야한다. 그림 1(a)와 같이, 기존의 OBC의 경우, 자성체 및 수동소자가 차지하는 공간 외에도 PFC단과 DC/DC단의 다수의 스위치를 사용하여 부피를 증가시키는 구조적 한계를 가진다.^[1]

이러한 구조적인 한계를 극복하기 위해 PFC단과 DC/DC단을 통합하는 연구가 활발히 진행되어 왔으나, 소자수 저감 효과가 적으며, 손실이 크기 때문에 OBC에 적용되지 못하고 소용량 전력변환장치를 대상으로 연구되어 왔다.^[2]

본 연구에서는 기존 통합 컨버터의 단점을 보완하고자 그림 1(b)와 같이 PFC단과 DC/DC단 1차측 스위치를 통합한 대용량 단일 전력단 OBC 회로를 제안한다. 제안 OBC는 부품수 저감을 통해 전력밀도, 가격경쟁력 및 소프트 스위칭 동작 영역이 존재하므로 효율 향상이 가능하여 OBC의 상품성을 극대화시킬 수 있다.

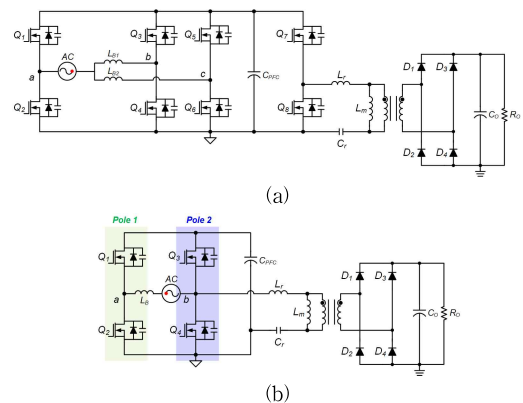


그림 1. (a) 기존 OBC 토폴로지, (b) 제안된 OBC 토폴로지
Fig. 1 (a) Conventional OBC Topology, (b) Proposed OBC Topology

2. 본 론

2.1 제안 OBC 동작 원리

제안 OBC의 DC/DC단은 HB LLC 공진형 컨버터이며, Pole 2의 스위치는 0.5 시비율로 동작, Pole 1의 스위치는 가변 시비율로 동작하게 된다. 제안 OBC의 동작모드는 그림 2와 같다.

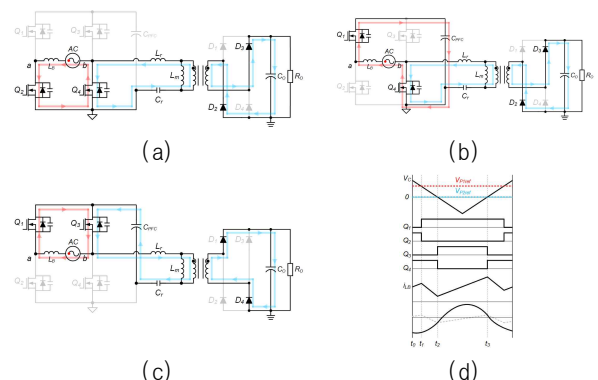


그림 2. 단일 전력단 OBC (a) Mode1(t_0-t_1). (b) Mode2(t_1-t_2). (c) Mode3(t_2-t_3). (d) 동작파형.
Fig. 2 Single Stage OBC (a) Mode1(t_0-t_1). (b) Mode2(t_1-t_2). (c) Mode3(t_2-t_3). (d) Operation Waveform.

Mode1 (t_0-t_1) : Q_2 , Q_4 는 턴온, Q_1 , Q_3 는 턴오프 상태로 PFC 부스트 인덕터(L_B)에 입력전압(V_{ac})이 인가되어 인덕터전류(i_{LB})가 증가한다. DC/DC단의 경우 변압기 자화 인덕턴스(L_M)에 1차측으로 투영된 출력 전압(nV_O)이 역으로 인가되어 자화전류가 감소하며, 공진탱크가 공진하여 저장된 에너지를 2차측으로 전달한다.

Mode2 (t_1-t_2) : Q_1 , Q_4 는 턴온, Q_2 , Q_3 는 턴오프 상태로 L_B 에 입력전압과 출력 전압의 차가 인가되어 i_{LB} 가 감소한다. 이때 DC/DC단의 동작은 Q_4 스위치가 턴온되어 있어 Mode1과 동일하다.

Mode3 (t_2-t_3) : Q_1 , Q_3 는 턴온, Q_2 , Q_4 는 턴오프 상태로 L_B 에 입력전압이 다시 인가되어 i_{LB} 가 증가한다. DC/DC단은 Q_3 가 턴온된 상태로 변압기에 nV_O 가 인가되어 2차측으로 i_{LM} 이 증가하며, 공진탱크를 통해 PFC단 출력 즉 DC/DC단 입력에서 2차측 출력 전력을 전달한다.

2.2 PFC, DC/DC단 설계

제안 OBC의 PFC단 부스트 인덕터의 경우 아래식을 통해 코어 선정이 가능하다.

$$A_P = \frac{L_m \times I_{Lmax}}{B_{max}} \times \frac{I_{in,rms}}{K_u \times J} \quad (1)$$

$$N_{max} = \frac{A_w \times K_u \times J}{I_{in,rms}} \quad (2)$$

$$N_{min} = \frac{L_m \times i_{Lmax}}{B_{max} \times A_e} \quad (3)$$

표 1. 인버터 타입 PFC parameter.
Table 1. Inverter type PFC parameter

구분	인버터 타입 PFC
입력전압 (V_{in})	220V
PFC 출력전압(V_{PFC})	700~800V
Q_1 - Q_2 스위치	C3M0032120K
부스트 인덕터(L_B)	176.57uH
PFC 출력 커패시터(C_{PFC})	240uF

표 2. 제안 HBLLC 공진형 컨버터 설계 parameter.
Table 2. Proposed HBLLC resonant converter design parameter.

구분	하프브리지 LLC 컨버터
입력전압 (V_{in})	700~800V
출력(P_O)/출력전압(V_O)	3.3kW / 400~800V
스위칭 주파수(f_s)	50~100kHz (Below, Above 영역 고려)
Q_3 - Q_4 스위치	C3M0032120K
변압기 (TR)	L_m : 250uH
공진 인덕터(L_r)	62.5uH
공진 커패시터(C_r)	82.5nF
D_1 - D_4 다이오드	STPSC20H12CWY
출력커패시터 (C_O)	1uF(B32656A0105J000 2병렬)

제안 인버터 타입 PFC의 파라미터는 표 1에 나타내었다. HB LLC 공진형 컨버터의 경우, 입출력 전압 조건을 고려하여 주파수 범위에 따른 전압 이득 마진을 고려한 K,Q 선정을 통해 3.3kW 설계를 진행하였으며 표 2에 설계 파라미터를 나타내었다.

3. 실험

인버터타입 PFC와 HBLLC 컨버터 통합 제어는 기존 인버터타입 PFC 제어를 수행하며, 추가적으로 HBLLC 컨버터의 전압 이득을 제어하기 위해 주파수 제어를 수행해야한다. 따라서, HBLLC 컨버터는 출력 전압 제어를 통해 Pole1 및 Pole2의 스위칭 주파수 제어 즉, PFM 제어를 수행하게 된다.

제안 OBC 실험의 경우 그림 4처럼 3.3kW 일때의 파형이며, 95% 이상의 효율을 달성하였다.

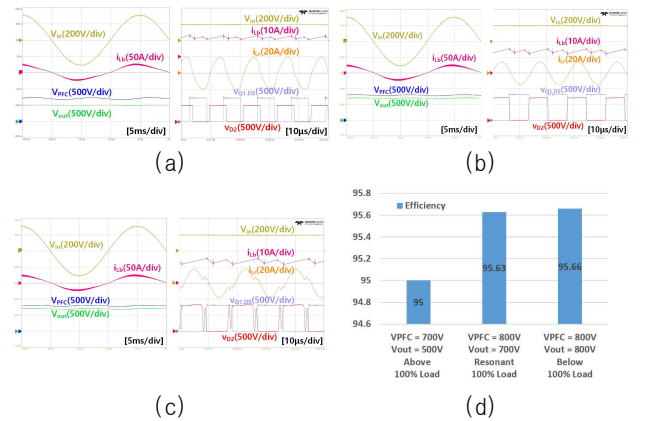


그림 4. (a) $V_{PFC}=700V/V_O=500V$, (b) $V_{PFC}=800V/V_O=700V$, (c) $V_{PFC}=800V/V_O=800V$, (d) 제안 OBC 효율

Fig. 4 (a) $V_{PFC}=700V/V_O=500V$, (b) $V_{PFC}=800V/V_O=700V$, (c) $V_{PFC}=800V/V_O=800V$, (d) Proposed OBC Efficiency

4. 결 론

본 연구를 통해 개발된 단일 전력단 OBC의 경우 기존 OBC 대비 최대 6개의 전력용 반도체 스위치를 저감 가능하여 가격경쟁력 향상 및 고전력밀도 달성이 가능하며, 95% 이상 효율 달성이 가능하다. 따라서 제안 OBC는 차세대 전기차 시장에서 높은 경쟁력 갖을것으로 예상된다.

이 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (20019386)

참 고 문 헌

- [1] F. Musavi, M. Edington, W. Eberle, and W. G. Dunford, "Evaluation and efficiency comparison of front end ac - dc plug-in hybrid charger topologies," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 3, no. 1, pp. 413 - 421, Mar. 2012.
- [2] Choi, W.Y., Yoo, J.S.: 'A bridgeless single-stage half-bridge AC/DC converter', IEEE Trans. Power Electron., 2011, 26, pp. 3884 - 3895.