

전기자동차용 고효율 3.3kW On-Board 배터리 충전기 설계 및 제작

김중수*, 최규영*, 정혜만*, 이병국*, 조영진**

*성균관대학교 정보통신공학부, **삼성전기 중앙연구소

Design and Implementation of High Efficiency 3.3kW On-Board Battery Charger for Electric Vehicle

Jong-Soo Kim*, Gyu-Yeong Choe*, Hye-Man Jung*, Byoung-Kuk Lee*, Young-Jin Cho**

*Sungkyunkwan University, **Samsung Electro-Mechanics

ABSTRACT

본 논문은 전기자동차 (Electric Vehicles, EVs) 및 플러그인 하이브리드 자동차 (Plug-In Hybrid Electric Vehicles, PHEVs)용 리튬 이온 (Li-Ion) 배터리 충전을 위한 3.3 kW급 차량 탑재형 (On-Board) 충전기 하드웨어의 설계 및 제작에 대하여 기술한다. 차량 실장 특성을 고려하여 부하직렬공진형 dc-dc 컨버터를 적용하고, 80-130kHz의 고주파 스위칭 및 ZVS (Zero-Voltage Switching) 기법을 통해 수동소자의 크기를 최적화하여 5.84L, 5.8kg의 저부피, 경량을 달성한다. 전자부하를 대상으로 정전류 (Continuous Current, CC) 및 정전압 (Continuous Voltage, CV) 제어를 수행하여 93%의 고효율 획득 및 성능을 검증한다.

1. 서 론

세계의 주요 국가들은 EV, PHEV를 중심으로 친환경 차량의 보급 활성화를 위한 다양한 정책을 펴고 있으며, 이의 조속한 상용화를 위해서는 핵심 에너지원인 배터리 뿐 아니라 이를 충전하기 위한 고효율 충전기 기술은 필수적이라 하겠다.

배터리 충전기는 일반적으로 30분 이내 충전이 가능한 급속 충전기 (>50kW)와 가정용 전원을 사용할 수 있는 탑재형 충전기 (3.3kW)가 주로 고려되고 있다. 이 중 탑재형 충전기는 에너지 효율 향상으로 일충전 주행거리를 늘리기 위해서 반드시 소형·경량으로 제작되어야 한다. 따라서 수동소자의 크기를 줄이기 위해 고주파 스위칭이 요구되며, 이로 인한 스위칭 손실저감을 저감하기 위해 다양한 공진특성을 이용한 ZVS 및 ZCS 기법 등이 적용되고 있다^[1]. 충전 알고리즘 측면에서는, 배터리의 수명, 안전, 효율을 고려하여 CC, CV, CC-CV, 펄스 충전과 같은 다양한 충전 방법이 연구되고 있다^[2]. 하지만 대부분의 경우 연구차원의 제품개발이며 실차 적용이 가능한 만족할 만한 제품은 매우 부족한 실정이다.

본 논문에서는, 6.9kWh급 Li-Ion 배터리 충전을 위한 3.3 kW급 차량 탑재형 충전기를 실차 적용이 가능하도록 부스트 컨버터를 이용한 연속전류모드 제어기법의 PFC 및 ZVS 스위칭이 가능한 부하직렬공진형 dc-dc 컨버터로 구현하였고, CC-CV 듀얼모드 충전 제어를 위해 80-130kHz의 가변 주파수 제어기법을 구현하였다. 이를 통해 최고 93%의 고효율, 0.995의 역률, 5.84L의 저부피 및 5.8kg의 경량을 획득하였으며, 이에 대한 설계 및 구현내용을 기술하였다.

2. 시스템 설계

2.1 하드웨어 설계

소형·경량화 및 고효율 획득을 위해서 풀브리지 구조의 부하직렬공진형 dc-dc 컨버터를 선택하였다. 그림 1은 제한한 충전기 시스템의 토폴로지를 나타내며 EMI 필터, ac-dc 정류기, PFC, dc-dc 컨버터로 구성된다.

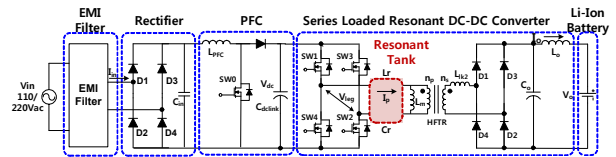


그림 1 3.3kW 탑재형 충전기 시스템 블록 다이어그램

Fig. 1 System configuration of 3.3kW on-board charger

탑재형 충전기 시스템은 차량 실장을 고려하여 하드웨어 부품의 크기와 시스템 효율 사이의 최적 설계가 필요하다. 따라서 스위치 손실, 수동소자의 크기, 제어 정밀도, 리플 크기 등을 고려하여 그림 2와 같이 71kHz의 공진주파수를 선택하였고, dc-dc 컨버터의 스위칭 주파수는 ZVS 확보 및 출력전압변동 범위를 고려하여 80-130kHz로 선정하였다. 공진 인덕터 (Lr)의 동손, 코어손, 크기 및 출력특성을 최적화 하여 Q-factor는 1.5로 선정하였으며

$$Q = (\sqrt{L_r / C_r}) / R_{Lac} \quad (1)$$

로 결정되고, 여기서 $R_{Lac} = (8 / \pi^2) * (R_{Lmin} / N^2)$ 이다.

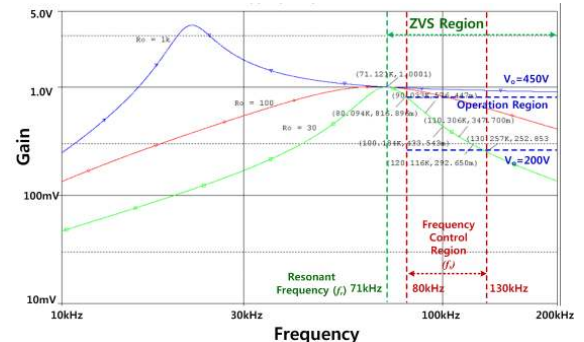


그림 2 주파수 및 운전 영역에 따른 공진이득곡선

Fig. 2 Gain characteristics according to frequency and operating region

Lr은 포화자속밀도, 스위칭 주파수 범위 및 주파수제어의 안정성을 고려하여 dc bias 특성이 일정한 페라이트 재질을 사용하였고, 공진 커패시터 (Cr)은 고주파 특성이 우수한 메탈 포일 전극을 가지는 폴리프로필렌 커패시터를 사용하였다.

고주파 변압기는 입출력 사양을 고려하여 1:1.7의 턴 비를 갖도록 설계하였고, 코어 선정을 위한 area product는 (2)와 같다.

$$W_a A_c = (P_{dc} C \cdot 10^8) / (4 \cdot e B f_s K) \quad (2)$$

PFC와 dc-dc의 MOSFET과 Diode는 입출력 전압정격을 고려하여 600V급으로 설계하였고, 전류정격 및 방열 시스템의 최적화를 통해 마진을 고려한 junction 온도가 115도 이하 (Tamb=65도 조건)가 되도록 설계하였다.

방열시스템 설계는 시스템 사양을 통해 선정된 전력용 반도체 소자의 손실을 계산하여 요구되는 방열 성능을 만족시킬 수 있는 열저항을 가진 방열판을 설계하였으며, 최적의 방열성능을 가지도록 배치와 구조를 설계하였다. 그림 3은 3.3kW 정격 조건에서 방열판의 온도분포 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

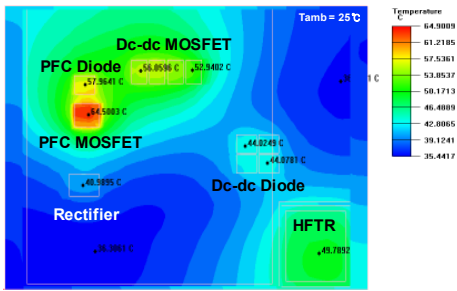


그림 3 방열판 온도분포 시뮬레이션 결과
Fig. 3 Simulation result of thermal distribution of heatsink

3. 시스템 제작 및 실험결과

개발된 충전기는 PFC 제어를 위해 CCM용 전용 아날로그 제어기를 사용하였고, 충전 알고리즘 (dc-dc 컨버터의 주파수 제어), 시퀀스제어 및 시스템 모니터링을 위해 TI사의 150MHz DSP F28335를 사용하였다. 또한 차량 내 BMS, ECU와 인터페이스를 위한 CAN 통신 및 사용자 인터페이스를 위한 RS232 통신을 적용하였다. 상세한 시스템 파라미터는 표 1에 나타내었고, 그림 5는 개발된 충전기의 외형을 보여준다.

입력전원은 NF사의 ac/dc 파워서플라이, 부하는 KIKUSUI사의 전자부하를 사용하였고, YOKOGAWA사의 WT3000으로 효율 및 역률을 측정하였다.

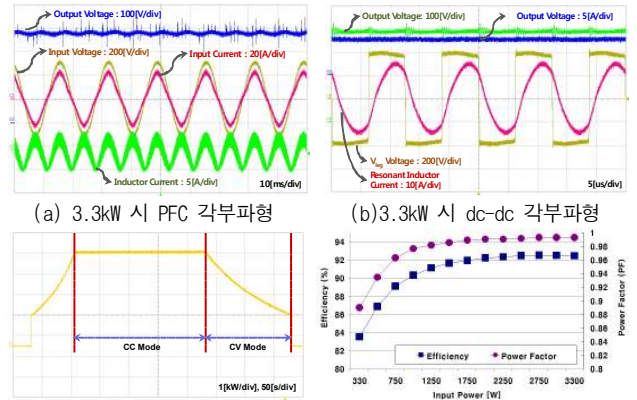
표 1 시스템 파라미터
Table 1 System parameters

Parameter	Value [Unit]
Rate Power	3.3 [kW] @220V, 1.6 [kW] @110V
Input Voltage	100-277 (+/-10%) [V _{rms}]
Output Voltage	200-450 (+/-2%) [V _{dc}]
Output Current	10 (+/-5%) [A]
Ripple Voltage	<25 [V _{pp}]
Ripple Current	<10% from I _{nominal}
Resonant Frequency	71 [kHz] (Q-factor = 1.58)
Switching Frequency	80-130kHz

그림 6(a)는 PFC 입력전압 및 전류, 인덕터 전류, 출력전압을 나타내며, 최고 0.995의 역률을 기록하였다. (b)는 부하직렬 공진형 dc-dc 컨버터의 출력전압 및 전류, leg 전압 및 공진 인덕터 전류를 나타낸다. 80-130kHz 전 영역에서 ZVS를 확보하였고, 출력전압 400V 시 20V, 출력전류 8.25A 시 약 0.1A의 리플을 나타낸다. (c)는 전자부하를 대상으로 3.3kW 정출력 운전 후 0kW까지 출력을 저감하며 CC-CV 제어를 통해 충전 모의 결과를 나타낸다. (d)는 전부하영역에서 시스템의 효율 및 역률을 나타낸 것이며, 최고 93.1%의 고효율을 획득하였다.



그림 5 개발된 EV용 3.3kW 탭재형 배터리 충전기 하드웨어
Fig. 5 Developed hardware of 3.3kW charger for EVs



(a) 3.3kW 시 PFC 각부파형 (b) 3.3kW 시 dc-dc 각부파형
(c) CC-CV 모의실험결과 (d) 시스템 효율 및 역률곡선
그림 6 실험결과
Fig. 6 Experimental results

4. 결론

본 논문은 EV용 3.3 kW급 탭재형 충전기의 설계 및 제작에 대하여 기술하였다. 부하직렬공진형 dc-dc 컨버터의 ZVS 및 주파수제어 기법을 통해 93%의 고효율을 획득하였고, 수동 소자 및 방열시스템의 최적 설계를 통해 경량, 저부피를 실현하였다. 개발된 충전기는 EV 및 PHEV 실차 적용이 가능할 것으로 판단되며, 향후 EV용 Li-Ion 배터리를 대상으로 충전 알고리즘에 대한 비교분석을 수행할 예정이다.

참고 문헌

[1] Y. C. Chuang and Y. L. Ke, "High-efficiency and low-stress ZVT-PWM DC-to-DC converter for battery charger", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 55, No. 8, pp. 3030-3037, August 2008.
[2] J. J. Chen, F. C. Yang, C. C. Lai, Y. S. Hwang, and R. G. Lee, "A high-efficiency multimode Li-Ion battery charger with variable current source and controlling previous-stage supply voltage", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 56, No. 7, pp. 2469-2478, July 2009.