

전기자동차용 3.3 kW 탑재형 배터리 충전기 설계 및 제작

金鍾秀*, 崔奎英*, 鄭惠萬**, 李秉國†, 趙榮眞***

Design and Implementation of 3.3 kW On-Board Battery Charger for Electric Vehicles

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

요 약

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 (Constant Current, CC) 및 정전압 (Constant Voltage, CV) 제어를 수행하여 92.5%의 고효율 획득 및 성능을 검증한다.

ABSTRACT

This paper presents a design and implementation of 3.3 kW on-board battery charger for electric vehicles or plug-in hybrid electric vehicles. Considering characteristics of the electric vehicles, a series-loaded resonant dc-dc converter and frequency control scheme are adopted to improve efficiency and reliability, and to reduce volume and cost. The developed on-board battery charger is designed and implemented by using high frequency of 80-130 kHz and zero voltage switching method. The experimental result indicates 92.5% of the maximum efficiency, 5.84 liters in volume, and 5.8kg in weight through optimal hardware design.

Key Words : On-board battery charger, Electric vehicles, Series-loaded resonant dc-dc converter, Li-ion battery, Design and implementation

1. 서 론

세계의 주요 국가들은 EV, PHEV를 중심으로 친환경 차량의 보급 활성화를 위한 다양한 정책을 펴고 있으며, 이의 조속한 상용화를 위해서는 핵심 에너지원

인 배터리 뿐 아니라 이를 충전하기 위한 고효율 충전기 기술은 필수적이다^[1].

배터리 충전기는 일반적으로 30분 이내 충전이 가능한 급속충전기 (>50 kW)와 가정용 전원을 사용할 수 있는 탑재형 충전기 (3.3 kW)가 주로 고려되고 있다. 이 중 탑재형 충전기는 에너지 효율 향상으로 일종전 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^{[2],[3]}. 충전 알고리즘

†교신저자 : 정희원, 성균관대 정보통신공학부 부교수

E-mail : bklee@skku.edu

*정희원, 성균관대 정보통신공학부 박사과정

**학생회원, 성균관대 정보통신공학부 석사과정

***정희원, 삼성전기 중앙연구소 책임연구원

접수일자 : 2010. 7. 27

1차 심사 : 2010. 8. 9

심사완료 : 2010. 8. 13

측면에서는, 배터리의 수명, 안전, 효율을 고려하여 CC, CV, CC-CV, 펄스 충전과 같은 다양한 충전 방법이 연구되고 있다^{[4],[5]}. 하지만 대부분의 경우 연구차원의 제품개발이며 실차 적용이 가능한 만족할 만한 제품은 매우 부족한 실정이다.

본 논문에서는, 6.9 kWh급 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 80~130 kHz의 가변 주파수 제어기법을 구현하였다. 이를 통해 최고 92.5%의 고효율, 0.995의 역률, 5.84 L의 저부피 및 5.8 kg의 경량을 획득하였으며, 이에 대한 설계 및 구현내용을 기술하였다.

2. 시스템 구성 및 제어 기법

2.1 시스템 구성 및 기본 이론

3.3 kW급 차량 탑재형 배터리 충전기는 충전전력을 가정용 전원, 상업 건물용 전원, 또는 충전 스탠드 등 상용계통으로부터 공급 받는다. 따라서 최대 3 kW 이상의 부하용량으로 인해 반드시 계통으로부터 유입되는 입력전류의 역률규제 (IEC 1000-3-4, Class D)를 만족시켜야 한다.

본 탑재형 충전기 개발에서는 다양한 역률보상 회로 (Power Factor Correction, PFC) 방식 중 입력

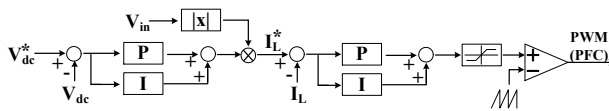


그림 1 PFC 제어 블록다이어그램
Fig. 1 Control block diagram for PFC

EMI 필터의 최소 설계가 가능하고, 상대적으로 낮은 rms 전류를 가지며, 최소의 부품으로 구현 가능한 전류연속모드 (Continuous Current Mode, CCM)의 단일 부스트 컨버터를 적용하였다. CCM 방식의 PFC의 제어는 그림 1과 같이외부부품의 전압제어기를 통해 dc link 전압 (V_{dc})을 정전압 제어하고, 동시에 교류 입력 전압의 절대값 정보로부터 부스트 컨버터의 인덕터 전류 지령을 생성하여 제어하는 내부 전류제어기로 구성 된다^[6].

탑재형 충전기의 EV 또는 PHEV 등 차량 내 탑재 특성상 dc-dc 컨버터는 수동소자의 크기를줄이기 위해 스위칭 주파수를 증가시키는 것이 요구된다. 이로 인한 스위칭 손실의 증가를 저감시키기 위하여 영전압 스위칭 (Zero Voltage Switching, ZVS)이 가능한 공진형 컨버터가 주로 고려된다.

다양한 공진형 컨버터 중 본 논문에서는 배터리 충전 프로파일을 고려하여 ZVS 확보 및 제어가 용이하고 최소의 부품으로 구성이 가능한 부하직렬공진형 dc-dc 컨버터를 선택하였다. 그림 2는 개발된 탑재형 충전기의 전체 시스템 구성도를 나타낸다.

부하직렬공진형 dc-dc 컨버터는 공진 네트워크 L_r, C_r 과 부하저항이 직렬로 연결된 구조의 컨버터로 식 (1) 과 같이 표현된다^{[7],[8]}.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 + j \frac{\pi^2}{8} Q \left[\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right]} \quad (1)$$

로 나타낼 수 있다.

여기서, $Q = \frac{\sqrt{L_r/C_r}}{R_L}$, $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}}$ 이다.

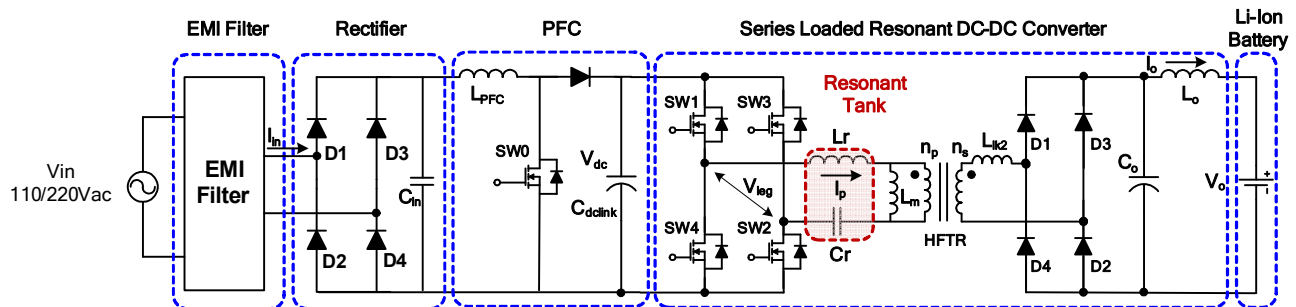


그림 2 개발된 3.3 kW급 탑재형 충전기의 구성
Fig. 2 System configuration of the developed 3.3 kW on-board battery charger

공진 인덕터 및 커패시터가 결정되면, 위 식에서와 같이 출력전압은 스위칭 주파수 및 부하저항에 따라 가변된다. 그러므로 충전상태에 따라 Li-Ion 배터리의 등가저항이 변하더라도 주파수 제어를 통하여 배터리에 인가되는 전류 및 전압을 가변제어 할 수 있다.

2.2 주파수 제어 기법

Li-Ion 배터리를 효율적으로 충전하기 위해서 그림 3과 같이 정전류 및 정전압 (CC-CV) 듀얼루프 제어를 적용하였다. 외부루프의 전압제어기에 의하여 전류 지령이 생성되고, 내부 전류제어기가 충전전류를 제어한다. 배터리 상태감시 시스템 (Battery Management System, BMS)으로부터 획득한 배터리 충전상태 (State of Charge, SOC)가 낮을 경우, 전압 제어기 출력은 리미터에 의해 포화되어 충전전류 지령이 정전류가 되도록 리미터 레벨을 설정하고, 일정 SOC 이상이 되면 정전압 모드로 전환되도록 설계하였다. 또한 충전전류 및 전압은 스위칭 주파수가 지령치를 추종하도록 가변주파수 제어 기법을 적용하였고, 이의 구현은 DSP의 Period 레지스터를 변수로 설정한 후 전압제어기 또는 전류제어기의 지령치를 추종하도록 레지스터 값을 증가 또는 감소시키도록 프로그래밍하였다. 이렇게 하면 식 (1)에서 알 수 있듯이, 충전상태에 따라 배터리의 등가임피던스 (부하저항)의 변화가 발생하더라도 스위칭 주파수의 가변을 통해 원하는 충전 전압 및 전류를 획득할 수 있다.

3. 배터리 충전기 설계 및 제작

본 장에서는 개발된 3.3 kW 탑재형 배터리 충전기의 상세한 설계 및 제작에 대해 기술한다.

시스템 설계의 첫 번째 단계는 dc-dc 컨버터의 공진 주파수를 선정하는 것으로, 수동소자의 크기 및 스위칭 손실의 트레이드 오프를 고려하여 $f_{sw}=71.6$ kHz로 선정하였다. 공진주파수 선정으로 인해 공진 네트워크의

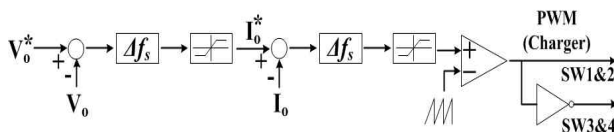


그림 3 충전 제어를 위한 최적 주파수 추종제어 기법
Fig. 3 Optimal frequency tracking scheme for charging control

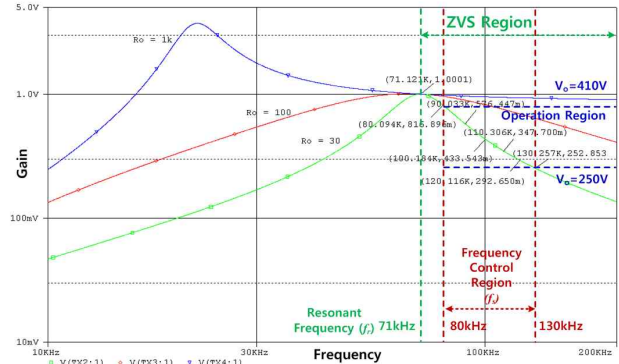


그림 4 공진특성곡선
Fig. 4 Resonant characteristic curve

표 1 시스템 파라미터
Table 1 System parameters

Parameters	Value [Unit]
Rated Power	3.3 [kW]
Input Voltage	100-277 (+/-10%) [V _{rms}]
Output Voltage	250-410 (+/-2V) [V _{dc}]
Output Current	10 (+/-10%) [A]
Ripple Voltage	< 25 [V _{pp}]
Ripple Current	< 10% from I _{nominal}
Switching Frequency	80-130 [kHz]
Resonant L & C	150 [uH] & 33 [nF]
Entire System Volume	< 6 [L]
Weight	< 6 [kg]

인덕턴스와 커패시턴스가 고정된 상수이므로, 공진이득은 부하저항 (R_L) 및 스위칭 주파수에 따라 변화된다. 이에 따른 공진이득곡선을 주파수 스위프를 통해 그림 4에 나타내었다. Li-Ion 배터리 100셀을 기준으로 약 250-410 V의 출력전압 가변제어 범위를 설정하였고, 이를 만족시키기 위하여 공진특성을 기반으로 스위칭 주파수는 80-130 kHz로 선정하였다. 상세한 시스템 사양은 표 1에 나타내었다.

3.1 능동소자 설계 [9],[10]

전력용 반도체인 MOSFET와 다이오드의 전압정격은 반복적으로 인가되는 최고 역전압 및 역전압 안전 동작영역 (Reverse Bias Safety Operation Area, RBSOA)을 고려하여 설계하여야 한다. 또한 PCB 패턴, 부스바, 전선 등의 부유 인덕턴스에 의해 식 (2)와

같이 RBSOA의 디레이팅이 존재하므로 이를 고려하여 600 V 급의 반도체 소자를 선정하였다.

$$V_{rated} \geq k \left(V_{pp} + L_{ts} \frac{di_s}{dt} \right) \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다

여기서, V_{pp} 는 반복적으로 인가되는 역전압의 최고 값이고, L_{ts} 는 스위치에 영향을 미치는 전체부유 인덕턴스의 합이며, k 는 마진이다.

데이터 시트에 명기된 MOSFET과 다이오드의 최대 전류용량은 일정한 케이스 온도를 기준으로 한 값이다. 실제의 경우 입출력 사양, 동작온도 조건, 특히 방열시스템의 조건에 따라 선택 가능한 전류용량이 크게 달라진다. PFC와 dc-dc MOSFET의 최종 전류용량 설계는 방열시스템과의 트레이드 오프 관계에 있으며 반도체 스위치의 접합부 온도가 어떠한 조건에서도 최고 125도를 초과하지 않도록 (실리콘 계 반도체의 경우) 각각 90 A 및 50 A급으로 선정하였다. 다양한 제조사 제품 중 스위칭 손실 저감을 위하여 E_{on} , E_{off} 가 낮고, 도통 손실 저감을 위하여 $R_{ds(on)}$ 낮으며, 출력 등가 커패시턴스에 의한 손실 저감을 위하여 C_{oss} 가 낮은 제품을 선정하였다.

3.2 수동소자 설계

PFC용 코일은 온도특성이 우수한 High Flux 코어를 사용하였다. 사용된 코어의 단면적은 0.678 cm^2 , 정상상태 인덕턴스는 56 nH/N^2 이며 투자율은 125 u이다. Dc-dc 컨버터의 공진 인덕터용 코어는 우수한 주파수 특성, 높은 포화자속밀도, 일정한 dc 바이어스 특성, 그리고 높은 투자율을 가지는 페라이트 코어를 사용하였다. 페라이트 코어의 경우 상대적으로 큐리 온도가 낮기 때문에 열관리에 유의하여야 하고, 최고 효율을 획득할 수 있는 코어의 온도조건에서 운전되도록 하기 위해 코어손 및 동손의 최적 손실 분담설계를 수행하였다. 고주파 변압기 역시 동일한 이유로 페라이트 코어를 사용하였으며, 입출력 계인을 고려하여 1:1.7의 변압기 턴비로 설계하였다.

3.3 방열시스템 설계

방열시스템은 3.1절에서 언급한 바와 같이 전력용 반도체 스위치의 접합부 온도를 125도 이하로 유지시키기 위한 설계가 필요하다. 이를 위해 반도체 스위치의 정확한 손실계산이 필요하다. 그림 5는 각 반도체

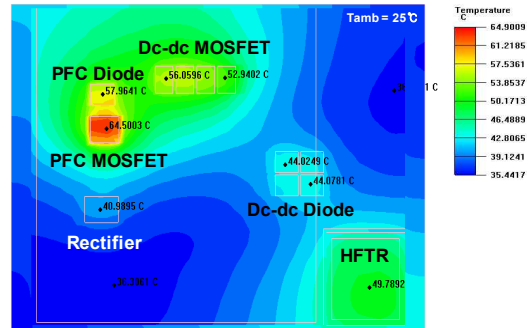
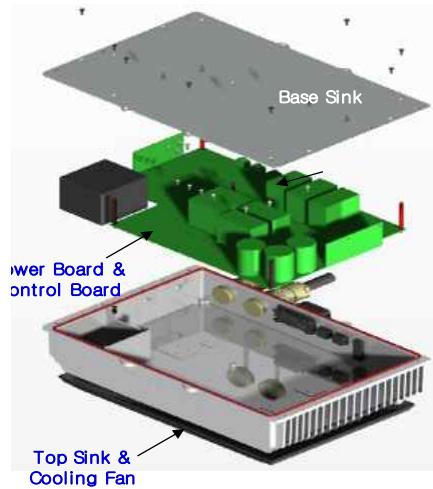
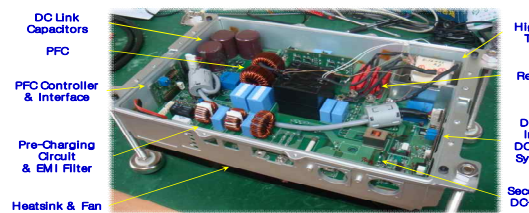


그림 5 방열판 온도분포 시뮬레이션 결과
Fig. 5 Simulation result for thermal distribution of the heatsink



(a)



(b)

그림 6 3.3 kW 탑재형 충전기 하드웨어 구현
(a) 3D 설계도, (b) 탑재형 충전기 사진

Fig. 6 Implemented hardware of 3.3 kW on-board charger (a) 3D drawing, (b) Picture of system

스위치의 계산된 손실을 바탕으로 최적의 방열구조가 되도록 열원 배치 및 팬 구조 선정을 위한 방열과 온

도분포 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 25도의 외부온도 조건에서 최고온도가 약 65도로 나타나므로, 차량내 탑재 시 발생 가능한 최고온도인 60도 조건에서도 실제 접합부의 온도는 125도 이하로 제한될 수 있다.

3.4 하드웨어 구현

정확한 하드웨어 설계를 위하여 3D 기구설계가 수행되었다. 경량·저부피 달성 및 우수한 방열 특성을 위하여 케이스와 방열판을 일체형으로 설계하였다. 그림 6(a)와 (b)는 각각 개발된 탑재형 충전기의 3D 도면과 제품 사진을 나타낸다.

4. 실험결과

개발된 배터리 충전기의 성능을 3.6 kW급 전자부하를 대상으로 검증하였다. 입력전원으로 NF사의 6 kW급 교류전원 공급장치를 사용하였고, 효율, 역률, 입출력 전압 및 전류 측정은 YOKOGAWA사의 전력분석기 WT3000을 사용하였다.

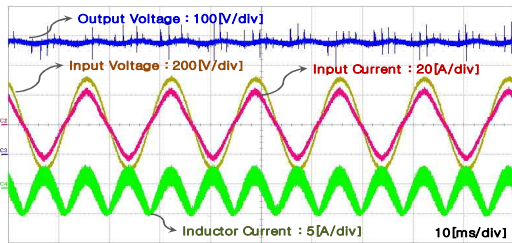


그림 7 3.3 kW 전부하 시 PFC 실험파형
Fig. 7 Experimental waveforms of PFC at full load condition of 3.3 kW

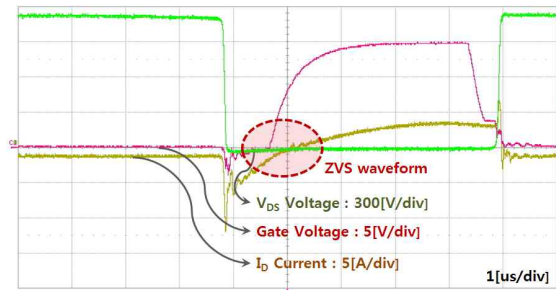


그림 9 80 kHz 조건에서의 ZVS 특성
Fig. 9 ZVS characteristic at 80 kHz condition

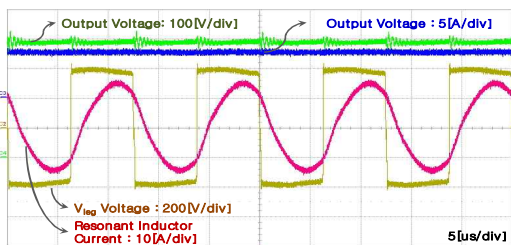


그림 8 3.3 kW 전부하 시 dc-dc 컨버터 실험파형
Fig. 8 Experimental waveforms of dc-dc converter at full load condition of 3.3 kW

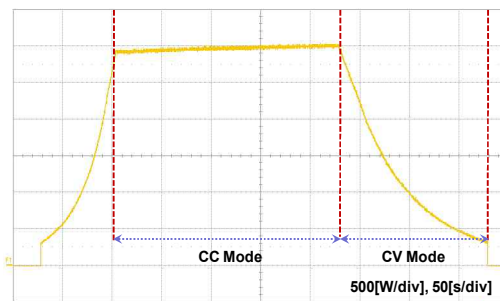


그림 10 CC-CV 제어 모의 충전시험
Fig. 10 Simulated battery charging test with CC-CV scheme

3.3 kW 최대부하 조건에서 PFC의 출력전압, 입력전류 및 인덕터 전류 파형을 그림 7에 나타내었다. 출력전압은 380 Vdc로 제어되고 입력전류 역시 정현파로 잘 제어되어 최고 0.995의 역률을 나타내었다.

그림 8은 배터리 충전 시 최대부하조건인 CC모드에서 CV모드로 전환되는 시점을 가정하여 3.3 kW 출력 조건에서 부하직렬공진형 dc-dc 컨버터의 각부 파형을 측정된 결과를 나타낸다. 그림 4의 공진이득곡선 시뮬레이션 결과와 같이, 주파수 제어기법을 통해 80 kHz의 스위칭 주파수 조건에서 출력전압은 400 V로 제어되며 리플전압은 약 20 V이하로 제한된다. 출력전류는 약 0.1 A의 리플을 포함한 8.25 A로 제어된다. 인덕터 전류는 dc-dc 컨버터의 1차측 레그 전압 (V_{leg})을 기준으로 지상의 사인파로 제어되며 최대부하조건에서 최적의 ZVS 영역을 확보되도록 설계되었음을 보여준다.

그림 9는 80 kHz 스위칭 조건에서 dc-dc 컨버터 MOSFET의 게이트 전압 및 드레인 전류, 인버터 레그 전압을 나타낸다. 드레인 전류는 Rogowski 코일로 측정하였고, MOSFET의 게이트가 턴-온 된 후까지 MOSFET의 body 다이오드를 통해 전류를 흐르는 것

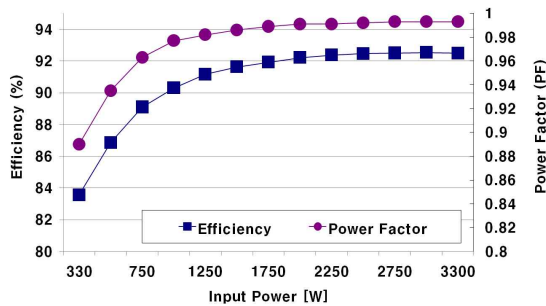


그림 11 전 부하 영역에서 효율 및 역률곡선
Fig. 11 Efficiency and power factor under entire power range

을 볼 수 있다. 즉, 최저 스위칭 주파수에서도 ZVS가 확보되는 것을 확인할 수 있다.

전자부하를 대상으로 그림 10과 같이 충전 프로파일을 모의한 실험을 수행하였다. 4분 동안 CC 제어를 모의한 최대 3 kW 전력을 출력하도록 출력 전류를 정전류로 제어하였고, 3분 동안 CV 제어를 모의하여 3 kW에서 0 W로 출력이 가변되도록 출력전압을 제어하였다. 본 실험을 통해 개발된 탑재형 배터리 충전기의 CC-CV 제어 알고리즘을 검증하였다.

전 부하영역에서의 효율과 역률을 그림 11에 나타내었다. 최저효율은 300 W에서 84%로 나타났고, 최고효율은 2.7 kW에서 92.5%를 기록하였다. 입력전류의 역률은 약 1 kW 이상부터 0.98 이상을 기록하였다.

5. 결 론

본 논문은 EV용 3.3 kW급 탑재형 충전기의 설계 및 제작에 대하여 기술하였다. 개발된 탑재형 충전기의 하드웨어는 부하직렬공진형 dc-dc 컨버터 및 주파수 추적 제어 기법이 적용되었고, 충전특성 및 차량 내 탑재를 고려하여 수동소자의 크기 및 스위칭 손실 간 최적설계를 수행하였다. 이를 통해 92.5%의 고효율을 획득하였고, 수동소자 및 방렬시스템의 최적 설계를 통해 5.8 kg, 5.84 L의 경량·저부피를 실현하였다. 개발된 충전기는 EV 및 PHEV 실차 적용이 가능 할 것으로 판단되며, 향후 EV용 Li-Ion 배터리를 대상으로 충전알고리즘에 대한 비교분석을 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

[1] M. M. Morcos, C. R. Mersman, G. G. Sugavanam, and N. G. Dillman, "Battery chargers for electric vehicles",

- IEEE Power engineering Review*, pp. 8-11, 2000, November.
- [2] Y. C. Chiang, Y. L. Ke, H. S. Chuang, and H. K. Chen, "Implementation and analysis of an improved series-loaded resonant dc/dc converter operating above resonance for battery chargers", *IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (ICPS) 2008*, pp. 1-8, 2008, May.
- [3] 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, 2008, August.
- [4] J. J. Chen, F. C. Yang, C. C. Lai, Y. S. Hwang, and R. G. Lee, "A highefficiency 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, 2009, July.
- [5] S. Y. Tseng, T. C. Shin, S. Y. Fan, and G. K. Chang, "Design and implementation of lithium-ion/lithium-polymer battery charger with impedance compensation", *IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS) 2009*, pp. 866-870, 2009, November.
- [6] 곽동걸, "소프트 스위칭형 PFC 백-부스트 AC-DC 컨버터에 관한 연구", *전력전자학회 논문지*, Vol. 12, No. 6, pp. 465-471, 2007. 12.
- [7] R. L. Steigerwald, "A comparison of half-bridge resonant converter topologies", *IEEE Trans. Power. Electron.*, Vol. 3, No. 2, pp. 174-182, 1988, April.
- [8] 김은수, 강성인, 정봉근, 차인수, 윤정필, "SLLC 직렬공진 컨버터 적용 승압형 DC/DC 컨버터", *전력전자학회 논문지*, Vol. 12, No. 1, pp. 56-64, 2007.
- [9] 김재형, 원충연, 이태원, "고효율 파워소자를 이용한 3.3kW PV-PCS의 Boost Converter 효율 개선", *전력전자학회지*, Vol. 14, No. 1, pp. 40-44, 2009.
- [10] U. Nicolai, T. Reimann, L. Petzoldt, J. Lutz, "Application manual power modules", SEMIKRON International, [Online]. Available: http://www.semikron.com/skcompub/en/application_manual-193.htm.

저 자 소 개



김종수(金鍾秀)

1975년 3월 5일생. 2008년 성균관대 대학원 전자전기컴퓨터공학과 졸업(석사). 2008년~현재 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 박사과정. 2000년~2005년 SEMIKRON Korea Application Engineer.



최규영(崔奎英)

1980년 4월 11일생. 2008년 성균관대 대학원 전자전기컴퓨터공학과 졸업(석사). 2008년~현재 동 대학원 전자전기컴퓨터공학과 박사과정.



정혜만(鄭惠萬)

1982년 11월 30일생. 2005년 경남대 전자전기공학과 졸업. 2009년~현재 성균관대 대학원 태양광시스템 협동과정 석사과정. 2005년~현재 (주)에어텍시스템 전임연구원.



이병국(李秉國)

1968년 12월 25일생. 1994년 한양대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 미국 Texas A&M University 전기공학과 졸업(공학박사). 2001년~2003년 미국 Texas A&M University Postdoctoral Research Associate. 2003년~2005년 한국전기연구원 전력전자그룹 선임연구원. 2005년~2006년 성균관대 연구조교수. 2006년~현재 성균관대 정보통신공학부 부교수. IEEE Senior Member. 현재 당 학회 기획이사.



조영진(趙榮眞)

1973년 3월 3일생. 1996년 중앙대 기계공학과 졸업. 1999년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학박사). 2007년~현재 삼성전기 중앙연구소 책임연구원.