

V2G-V2H 기능을 갖는 3.3kW급 전기자동차용 양방향 충전기

정세형¹, 홍석용², 박준성¹, 최세완[†]

A 3.3kW Bi-directional EV Charger with V2G and V2H function

Se-Hyung Jung¹, Seok-Yong Hong², Jun-Sung Park¹, and Se-Wan Choi[†]

Abstract

This paper proposes a 3.3-kW bi-directional EV charger with V2G and V2H functions. The bi-directional EV charger consists of a DC-DC converter and a DC-AC inverter. The proposed EV charger is suitable for wide battery voltage control due to the two-stage configuration of the DC-DC converter. By employing a fixed-frequency series loaded resonant converter as the isolated DC-DC converter, zero-current-switching can be achieved regardless of battery voltage variation, load variation, and power flow. A 3.3-kW prototype of the proposed EV charger has been built and verified with experiments, and indicates a maximum efficiency of 94.39% and rated efficiency of 94.23%.

Key words: EV(Electric Vehicle), V2G(Vehicle to Grid), V2H(Vehicle to Home), Bi-directional battery charger, ZCS(Zero Current Switching), SRC(Series Resonant Converter)

1. 서 론

현재 자동차 시장은 지속적으로 상승하는 가솔린 가격과 화석 연료 엔진에 의해 생성되는 환경오염에 대한 우려로 인해 화석 연료의 사용을 줄이기 위한 새로운 대안으로 전기자동차 및 하이브리드 자동차에 대한 연구를 진행하고 있다.^{[1][2]}

일반적으로 전기자동차는 단방향 충전기를 사용하여 계통으로부터 전기에너지를 공급받아 배터리를 충전하고, 배터리에 저장된 전기에너지를 사용하여 차량을 동작시킨다.^{[3][4]} 최근 전기자동차를 스마트그리드 영역에서 활용하려는 시도가 다양하게 이뤄지고 있다.^[5] 특히 충전기를 양방향으로 사용하여 전기자동차 배터리에 저장된 전기에너지를 전력망으로 재송전함으로써 운전자가 전기 요금이 저렴한 야간 시간에 전력을 저장한 뒤 요금이 비싼 주간 시간에 되팔 수 있게 하는 V2G

(Vehicle to Grid)에 대한 개발 및 실증이 활발히 진행되고 있다.^{[6][7]} 더불어 정전 시 배터리에 축적된 전기에너지를 가정에 공급하는 V2H(Vehicle to Home) 모드 또한 스마트그리드의 핵심 솔루션으로 부상하고 있다.^{[8][9]}

일반적으로 양방향 배터리 충전기는 배터리 측 양방향 DC-DC 컨버터와 계통 측 양방향 DC-AC 인버터로 구성된다. 충전 또는 V2G 동작 시 DC-AC 인버터가 DC링크 커패시터의 전압을 제어하고 DC-DC 컨버터는 배터리 CC-CV를 제어하며, V2H 동작 시 DC-DC 컨버터가 DC링크 커패시터의 전압을 제어하고 DC-AC 인버터는 AC측 전압을 제어하는 것이 일반적이다. 따라서 이러한 경우 충전 또는 V2G 모드에서 V2H 모드로 전환 시 DC-DC 컨버터와 DC-AC 인버터가 모두 모드전환을 하기 때문에 과도상태가 큰 문제가 있다. 또한 양방향 DC-DC 컨버터로서 양방향 하프-브릿지 컨버터를 사용할 수 있는데 이는 회로가 간단하고 끊임없는 모드 전환 및 넓은 배터리 전압 제어범위를 갖는다.^[10] 하지만 전기적으로 절연이 되어 있지 않아 차량용 충전기로 적합하지 않다. 양방향 DC-DC 컨버터로서 Dual Active Bridge(DAB)는 회로가 간단하며 위상차를 이용하여 전력흐름을 제어하는 방식으로 추가 회로 없이 모든 스위치가 ZVS 턴온이 가능하다.^[11] 하지만 전압이나 전력의 변동으로 위상이 증가하게 되면 무효전력과 소자들의 전류 정격이 증가한다. 또한 입력과 출력의 전압비가 다

Paper number: TKPE-2015-20-1-4

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: schoi@seoultech.ac.kr, Dept. of Electrical & Information Eng., Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

Tel: +82-2-970-6542 Fax: +82-2-972-2866

¹ Dept. of Electrical & Information Eng., Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

² SIGNETSYSTEMS INC.

Manuscript received Sep. 29, 2014; accepted Nov. 18, 2014

— 본 논문은 편집위원회에서 우수기술논문으로 추천됨

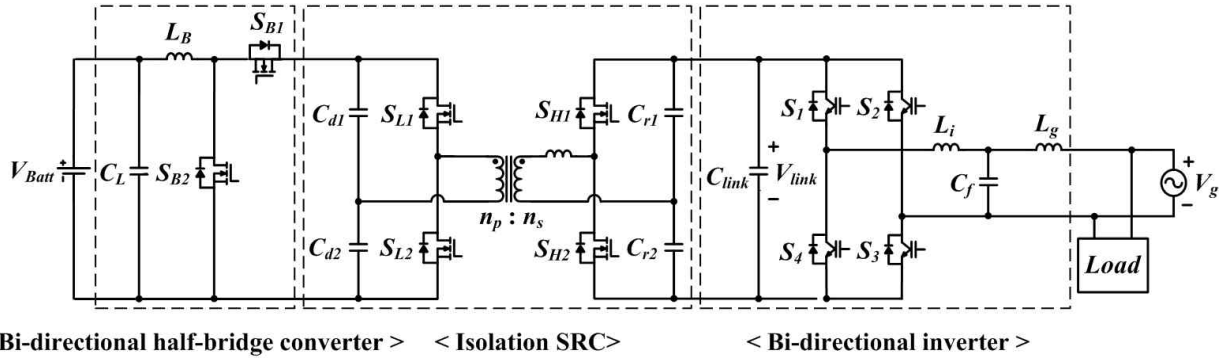


Fig. 2. Proposed battery charger.

르게 되면 경 부하에서 소프트 스위칭을 실패하는 문제가 있다. 양방향 CLLC 공진형 컨버터는 넓은 배터리 전압 제어범위를 갖고, 전 부하에서 모든 스위치가 소프트 스위칭을 하는 장점이 있다.^[12] 하지만 공진 탱크가 복잡하여 컨버터를 설계하기 어려우며 모드 전환 시 과도상태가 발생하는 단점이 있다.

본 논문에서는 배터리 충전 뿐 아니라 V2G, V2H 모드로 동작이 가능한 전기자동차용 양방향 배터리 충전기를 제안한다. 제안하는 배터리 충전기는 양방향 DC-AC 인버터와 2단 방식의 양방향 DC-DC 컨버터^[13]를 사용하여 넓은 배터리 전압 제어 범위를 갖는다. 양방향 DC-DC 컨버터의 비절연부는 양방향 하프-브릿지 컨버터를 사용하였고, 절연부는 고정주파수 동작의 SRC를 사용하였다. 양방향 대칭의 특성을 갖는 절연형 SRC를 고정 주파수로 동작시킴으로써 최적 설계가 가능할 뿐만 아니라 전력의 방향과 부하 및 전압변동에 상관없이 항상 ZCS 턴온/턴오프를 성취하게 하였다. 또한 본 논문에서 제안한 제어방식은 DC-AC 인버터가 충전 또는 V2G 동작 시 배터리 CC-CV를 제어하고 V2H 동작 시 AC측 전압을 제어하며, DC-DC 컨버터는 모드와 상관없이 항상 DC링크 커패시터 전압을 제어한다. 따라서 모드 전환 시 DC-DC 컨버터는 모드를 전환하지 않고, DC-AC 인버터만 모드를 전환하기 때문에 과도상태를 줄일 수 있다.

2. 제안하는 전기자동차용 양방향 충전기

제안하는 전기자동차용 양방향 충전기는 그림 1과 같이 배터리 측의 DC-DC 컨버터와 계통 측의 인버터로 구성되어 있다. 그림 1(a)와 같이 충전 모드 시에는 계통에서 가정용 부하에 전력을 공급하고, 배터리를 충전한다. V2G 모드 시에는 그림 1(b)와 같이 배터리를 방전하여 부하에 전력을 공급하고, 남은 전력을 계통으로 주입한다. 계통 정전 시 충전기는 V2H 모드로 동작하며 그림 1(c)와 같이 배터리에서 부하에 전력을 공급한다.

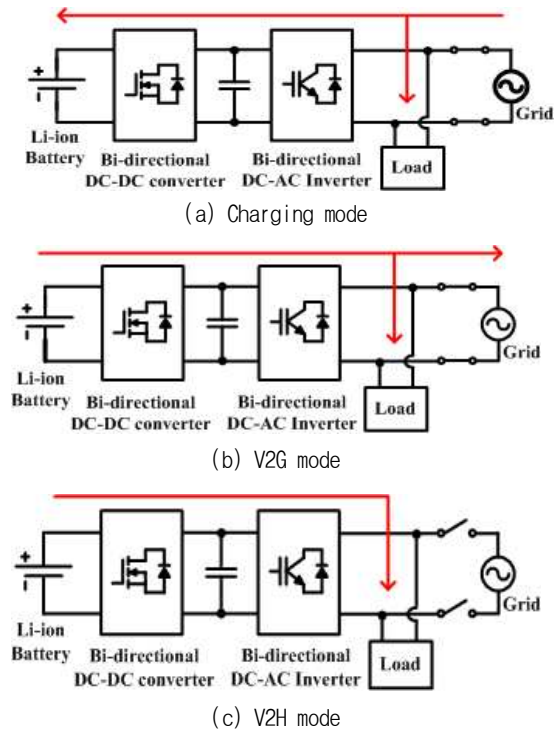


Fig. 1. Operating modes of the bi-directional battery charger.

2.1 제안하는 충전기 회로구성

그림 2는 제안하는 양방향 충전기의 전체 회로도이다. 양방향 인버터는 풀-브릿지 구조를 사용하였으며 LCL 필터를 통해 계통과 연계된다. DC-DC 컨버터는 비절연형 양방향 하프-브릿지 컨버터와 절연형 SRC로 구성하였다. 제안하는 충전기는 2단 방식의 컨버터를 사용하여 배터리 전압의 제어 범위를 넓혔으며, 절연형 SRC의 경우 그림 3과 같이 부하변동에도 Gain이 변하지 않는 최적 주파수 지점에서 동작시키므로 그림 4와 같이 전 부하 영역에서 항상 ZCS 턴온/턴오프가 성취된다. 또한 1차 측을 하프-브릿지, 2차 측을 더블러 형태로 구성하여 변압기 자화 인덕턴스의 직류 오프셋이 발생하지 않게 하였다.

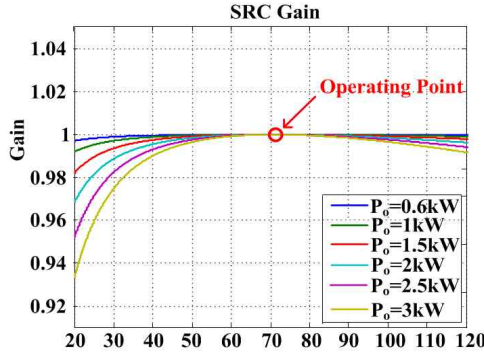


Fig. 3. Gain curve according to frequency variation.

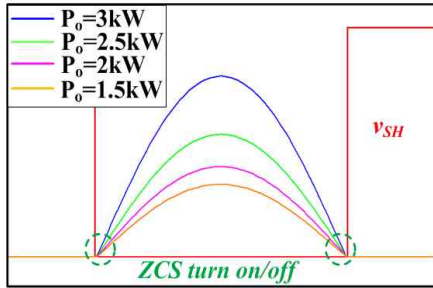


Fig. 4. Waveforms of SRC switch current and voltage.

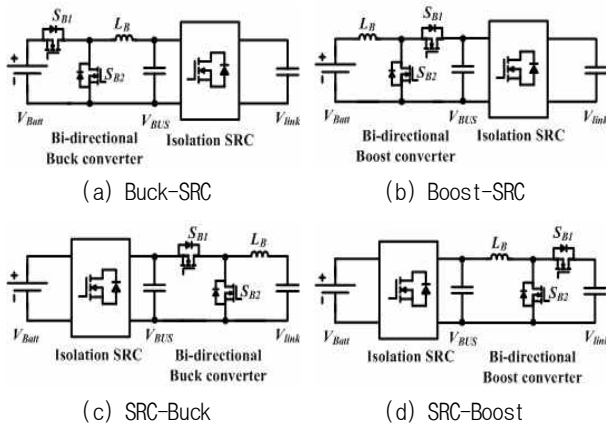


Fig. 5. Four types of 2-stage converter.

2단 방식의 컨버터는 그림 5과 같이 Buck-SRC, Boost-SRC, SRC-Buck, SRC-Boost 4가지 타입으로 분류할 수 있다. 표 1에서 볼 수 있듯이 SRC-Buck 타입은 양방향 하프-브릿지 컨버터의 스위치와 SRC High Side 스위치의 전압 정격이 높고, Buck-SRC와 SRC-Boost 타입은 배터리 전류 리플을 줄이기 위한 추가 필터 인덕터가 필요한 단점이 있다. Boost-SRC 타입은 배터리 리플을 줄이기 위한 추가적인 인덕터가 필요 없고 모든 스위치의 전압 정격이 낮은 장점이 있어서 2단 방식의 컨버터로 선정하였다.

2.2 양방향 충전기 제어 알고리즘

제안하는 양방향 충전기의 제어 블록도는 그림 6과 같다. 절연형 SRC는 고정 듀티와 고정 주파수로 동작하

TABLE I
COMPARISON OF SWITCH VOLTAGE AND CURRENT RATING BETWEEN 2-STAGE CONVERTERS

	Buck-SRC	Boost-SRC	SRC-Buck	SRC-Boost
V_{SB1}	250V	410V	672V	410V
I_{SB1}	13.2A	8.04A	6.4A	8.04A
V_{SB2}	250V	410V	672V	410V
I_{SB2}	5.4A	5.4A	6A	5.4A
$V_{SH1,2}$	410V	410V	672V	410V
$I_{SH1,2}$	12.6A	12.6A	7.68A	12.6A
$V_{SL1,2}$	250V	410V	410V	410V
$I_{SL1,2}$	20.7A	12.6A	12.6A	12.6A

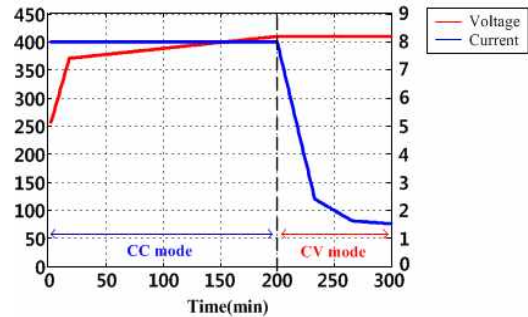


Fig. 7. Battery charging and discharging profile.

며 양방향 하프-브릿지 컨버터는 V_{link} 를 410V로 제어하고 내부로 배터리 전류를 제어한다. 내부 전류 제어의 대역폭을 전압 제어기에 비해 높게 선정하여 배터리로 들어가는 120Hz 성분의 전류 리플을 제거한다. DC-DC 컨버터는 모드(충전, V2G, V2H)와 상관없이 항상 같은 제어를 수행하기 때문에 제어기 구조가 간단하며 모드 전환 문제가 없다는 장점이 있다. DC-AC 인버터의 경우 모드 전환과 파워 흐름을 제어한다. V2G, 충전 모드 시 CC-CV 제어를 하며 내부로 인버터 출력필터의 전류를 제어하는데, 이 때 동기좌표 PLL 기법을 적용하여 계통 전압과 인버터 출력전류의 위상을 동기화시켜 PF를 1로 제어한다. 정전 시에는 V2H 모드로 전환하여 인버터 출력 커패시터의 전압을 제어한다. 비선형 부하를 고려할 경우 전압제어 루프의 대역폭을 넓히기 위해 내부 루프로 i_{Li} 나 i_{Cr} 를 제어하는 기법들이 연구되어 있으며, [14][15] 필요시 본 논문에도 적용이 가능하다.

전기자동차용 충전기는 그림 7과 같은 프로파일을 가지고 배터리를 충전하게 된다. CC충전 모드로 배터리를 충전하면 V_{Batt} 이 증가하고, V_{Batt} 이 CV까지 도달하게 되면 CV충전 모드로 전환된다. 제안하는 충전기는 CV충전 모드에서 V_{Batt} 이 V_{link} 와 같으며, 양방향 하프-브릿지 컨버터의 메인 스위치가 턴 온 상태로 유지되는 바이패

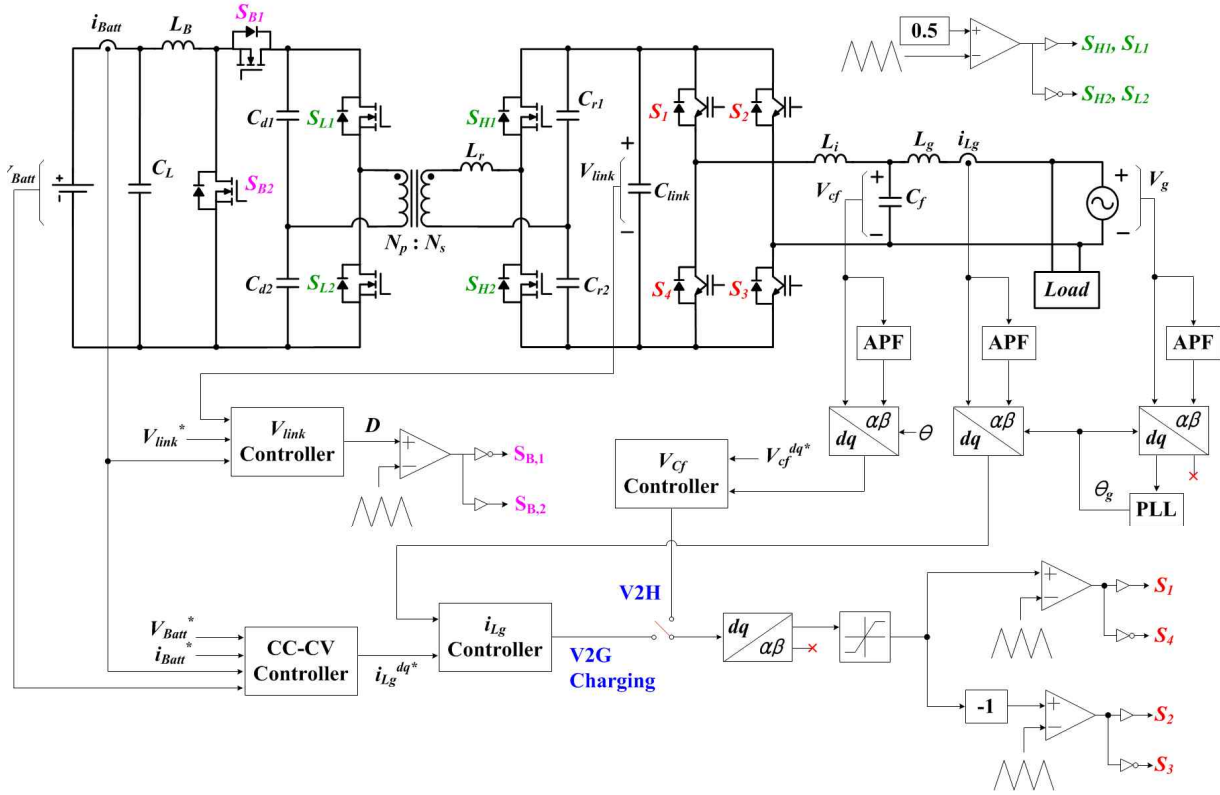


Fig. 6. Control algorithm for proposed battery charger.



Fig. 8. Prototype of the proposed battery charger.

스 모드로 동작하여 스위칭 손실이 발생하지 않기 때문에 효율을 높일 수 있다.

3. 실험 결과

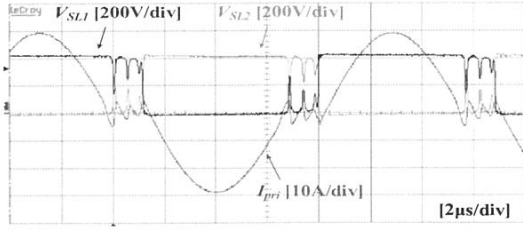
표 2는 제안하는 양방향 충전기의 설계사양이다. 제안하는 양방향 충전기는 충전 모드뿐만 아니라 V2G, V2H 모드가 모두 가능하며 250V ~ 410V의 넓은 배터리 전

TABLE II
DESIGN SPECIFICATION OF THE PROPOSED BATTERY CHARGER

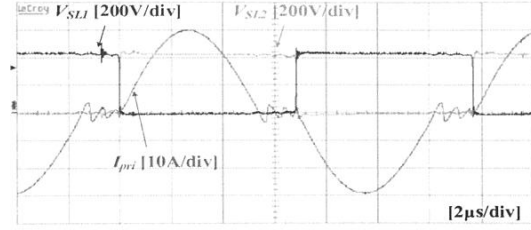
Output Power	3.3 kW
Grid Voltage	1-Phase 110 / 220 V_{ac}
Battery Voltage	250 ~ 410 V_{dc}
Power Factor	> 0.99
Current THD	< 5%
Voltage THD	< 5%
Operating Mode	Charging / V2G / V2H
$N_p : N_s$	1 : 1
L_r	3 μ H
L_B	2 mH
C_L	0.22 μ F
L_i	2.4 mH
C_f	5 μ F
L_g	3.54 mH

압 범위를 갖는다. 계통 전압 또한 110V와 220V 모두 가능하도록 설계하였다.

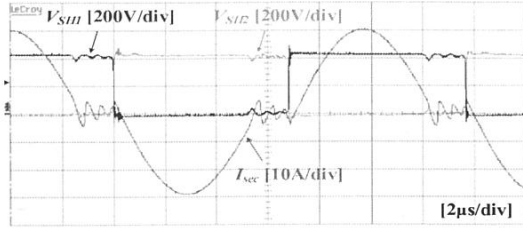
그림 8은 제안하는 충전기의 3.3kW급 시제품 사진이다. 시제품은 2층 구조로 설계하였으며 1층에는 컨버터·인버터 통합 파워스택, 2층에는 통합 제어보드와 게이트



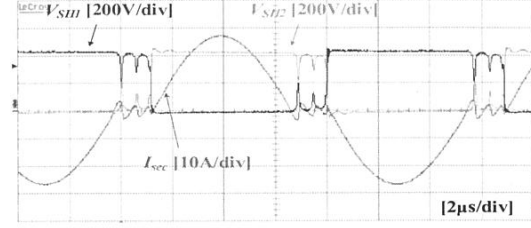
(a) Primary side of SRC



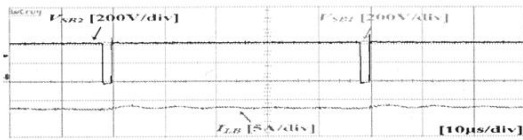
(a) Primary side of SRC



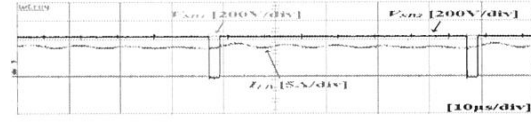
(b) Secondary side of SRC



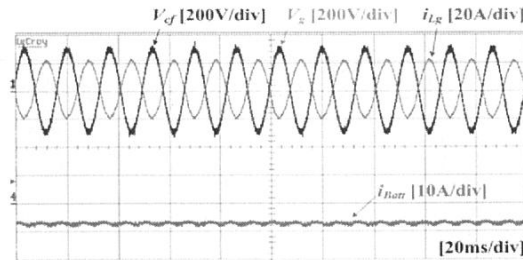
(b) Secondary side of SRC



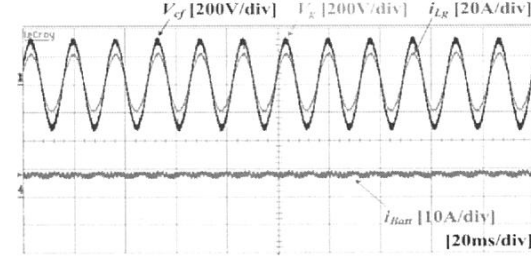
(c) Bi-directional half-bridge converter



(c) Bi-directional half-bridge converter



(d) Bi-directional inverter and battery current



(d) Bi-directional inverter and battery current

Fig. 9. Waveforms of the proposed battery charger during charging mode ($V_{batt} = 410V$).

Fig. 10. Waveforms of the proposed battery charger during V2G mode ($V_{batt} = 410V$).

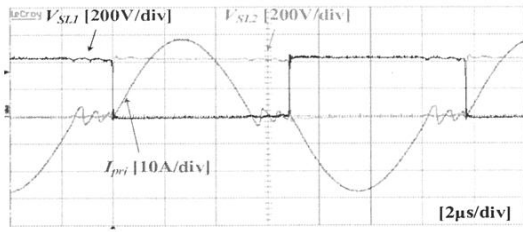
드라이버로 구성되어 있다. 외장형 충전기에 배터리가 연결되면 SMPS를 통해 배터리 측에서 제어보드로 전원을 공급하여 정전 시에도 충전기가 동작되도록 하였다.

그림 9는 충전 모드 실험파형이다. 그림 9(a)와 (b)로부터 SRC의 1, 2차 측 스위치가 ZCS 턴온/턴오프를 성취하는 것을 확인할 수 있다. 그림 9(c)는 비절연형 컨버터의 실험파형으로 I_{LB} 의 방향으로부터 충전 모드라는 것을 알 수 있다. 그림 9(d)는 양방향 인버터의 출력파형이며 충전 모드이므로 출력전압과 출력전류의 위상이 반대인 것을 확인할 수 있다.

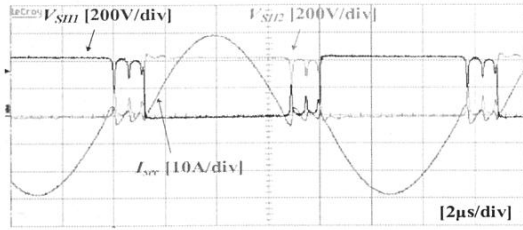
그림 10은 계통과 연계하여 배터리를 방전하는 V2G

모드이고, 충전 모드와 비교하였을 때 전류의 방향이 반대인 것을 확인할 수 있다. 그림 11과 12는 정전 시 배터리 측에서 가정용 부하에 전력을 공급하는 V2H 모드이며, 각각 R 부하와 RC 부하를 가정하였다.

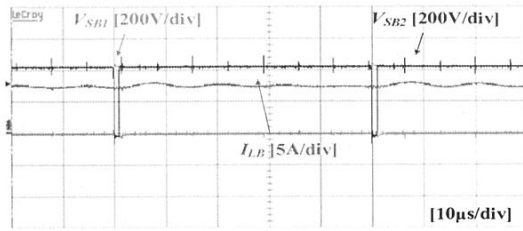
그림 13은 제안하는 충전기의 효율 그래프이며 배터리 전압이 410V일 때 양방향 하프-브릿지 컨버터의 메인 스위치가 바이패스 모드로 동작하기 때문에 가장 높은 효율을 보였다. 그림 10(a)에서 볼 수 있듯이 충전 모드에서는 2.5kW에서 94.39%의 최대효율, 94.23%의 정격 최대효율을 달성하였다. 그림 10(b)는 방전(V2G, V2H) 모드에서의 효율 그래프로 2.5kW에서 94.02%의 최대효율, 93.92%의 정격 최대효율을 보인다.



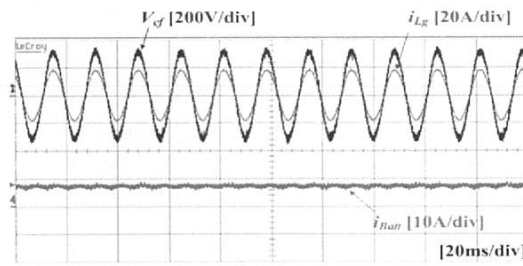
(a) Primary side of SRC



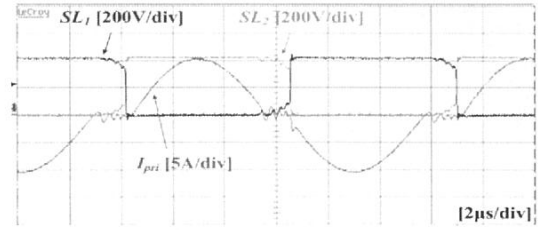
(b) Secondary side of SRC



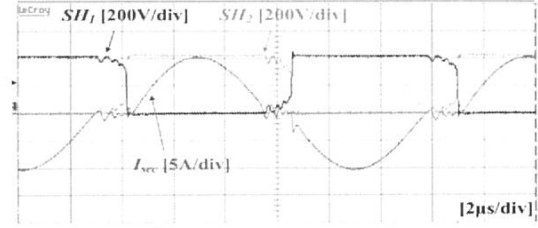
(c) Bi-directional half-bridge converter



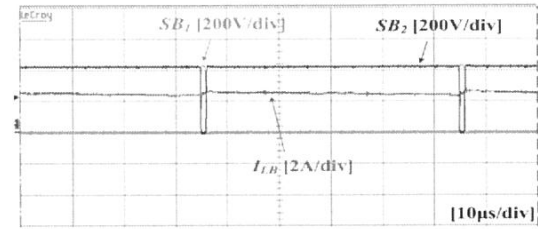
(d) Bi-directional inverter and battery current



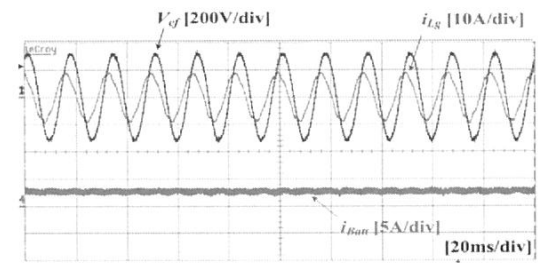
(a) Primary side of SRC



(b) Secondary side of SRC



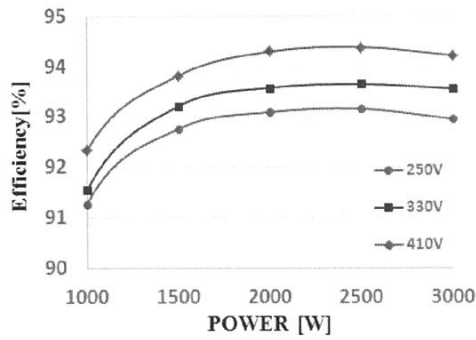
(c) Bi-directional half-bridge converter



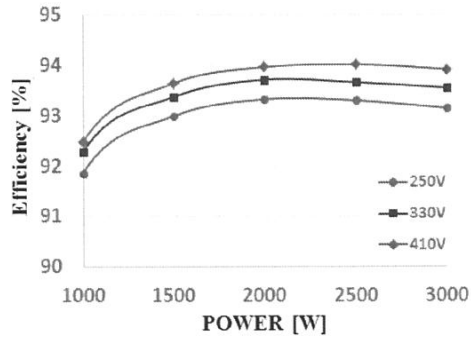
(d) Bi-directional inverter and battery current

Fig. 11. Waveforms of the proposed battery charger during V2H mode ($V_{Batt} = 410V$, R Load).

Fig. 12. Waveforms of the proposed battery charger during V2H mode ($V_{Batt} = 410V$, RC Load).



(a) Charging mode



(b) Discharging mode

Fig. 13. Measured efficiency of the proposed battery charger using Yokogawa WT3000.

5. 결 론

본 논문에서는 배터리 충전뿐만 아니라 V2G, V2H 모드로 동작이 가능한 전기자동차용 양방향 충전기를 제안했다. DC-DC 컨버터를 2단 방식으로 사용하여 배터리 전압의 제어 범위를 넓혔으며 절연형 SRC를 고주파수로 동작시켜 절연부 최적설계가 가능하고 전력의 방향과 배터리 전압 및 부하에 상관없이 스위치는 항상 ZCS 턴온/턴오프를 성취한다. 또한 CV충전 모드에서 양방향 하프-브릿지 컨버터의 메인 스위치를 바이패스 모드로 동작시켜 스위칭 손실을 줄였다.

3.3kW 시제품 실험을 통해 배터리 충전 및 V2G, V2H 모드에 대한 동작을 검증하였고 94.39%의 최대효율 및 94.23%의 정격 효율을 달성하였다.

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2014R1A2A2A01003724)

References

- [1] B. Kramer, S. Chakraborty, and B. Kroposki, "A review of plug-in vehicles and vehicle-to-grid capability," in *Proc. IECON*, pp. 2278-2283, 2008.
- [2] D. S. Gautam, F. Musavi, M. Edington, W. Eberle, and W. G. Dunford, "An automotive onboard 3.3-kW battery charger for PHEV application," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. 61, No. 8, pp. 3466-3474, Oct. 2012.
- [3] J. Y. Lee and H. J. Chae, "6.6-kW onboard charger design using DCM PFC converter with harmonic modulation technique and two-stage DC/DC converter," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 61, No. 3, pp. 1243-1252, Mar. 2014.
- [4] S. Li, J. Deng, and C. C. Mi, "Single-stage resonant battery charger with inherent power factor correction for electric vehicles," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. 62, No. 9, pp. 4336-4344, Nov. 2013.
- [5] H. Wang, S. Dusmez, and A. Khaligh, "Design and analysis of a full-bridge LLC-based PEV charger optimized for wide battery voltage range," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. 63, No. 4, pp. 1603-1613, May 2014.
- [6] A. K. Verma, B. Singh, and D. T. Shahani, "Grid to vehicle and vehicle to grid energy transfer using single-phase bidirectional AC-DC converter and bidirectional DC-DC converter," in *Proc. ICEAS*, pp. 1-5, 2011.
- [7] Y. Fan, Z. Xue, and X. Han, "Bi-directional converting technique for vehicle to grid," in *Proc. ICEMS*, pp. 1-5, 2011.
- [8] X. Zhou, S. Lukic, S. Bhattacharya, and A. Huang, "Design and control of grid-connected converter in bi-directional battery charger for plug-in hybrid electric vehicle application," in *Proc. VPPC*, pp. 1716-1721, 2009.
- [9] X. Zhou, S. Lukic, and A. Huang, "A comparison of converter topologies for vehicle-to-grid applications: three-leg converter versus H-bridge converter," in *Proc. IECON*, pp. 3711-3716, 2009.

- [10] J. G. Pinto, V. Monteiro, H. Gonçalves, B. Exposto, D. Pedrosa, C. Couto, and J. L. Afonso, "Bidirectional battery charger with grid-to-vehicle, vehicle-to-grid and vehicle-to-home technologies," in *Proc. IECON*, pp. 5934-5939, 2013.
- [11] T. Ngo, K. H. Lee, J. H. Won, and K. H. Nam, "Study of single-phase bidirectional battery charger for high power application," in *Proc. IPEMC*, pp. 958-962, 2012.
- [12] H. S. Kim, M. H. Ryu, J. W. Baek, and J. H. Jung, "High-efficiency isolated bidirectional AC-DC converter for a DC distribution system," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 28, No. 4, pp. 1642-1654, Apr. 2013.
- [13] J. S. Park and S. W. Choi, "Design and control of a bidirectional resonant DC-DC converter for automotive engine/battery hybrid power generators," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 29, No. 7, pp. 3748-3757, Jul. 2014.
- [14] D. Dong, T. Thacker, R. Burgos, W. Fei, and D. Boroyevich, "On zero steady-state error voltage control of single-phase PWM inverters with different load types," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 26, No. 11, pp. 3285-3297, Nov. 2011.
- [15] M. Monfared, S. Golestan, and J. M. Guerrero, "Analysis, design, and experimental verification of a synchronous reference frame voltage control for single-phase inverters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 61, pp. 258-269, 2014.



정세형(鄭勢亨)

1988년 5월 30일생. 2013년 서울과학기술대 전기정보공학과 졸업. 2013년~현재 동 대학원 전기정보공학과 석사과정.



홍석용(洪錫龍)

1987년 1월 9일생. 2012년 서울과학기술대 IT미디어전자과 졸업. 2014년 동 대학원 전기정보공학과 졸업(석사). 2014년~현재 시그넷시스템 연구원.



박준성(朴峻成)

1982년 4월 26일생. 2009년 서울과학기술대 제어측공학과 졸업. 2011년 동 대학 에너지환경대학원 신에너지공학과 졸업(석사) 2011년~현재 동 대학원 박사과정.



최세완(崔世琬)

1963년 3월 3일생. 1985년 인하대 전자공학과 졸업. 1992년 Texas A&M Univ. 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 졸업(공학박). 1985년~1990년 대우중공업 중앙연구소 대리. 1996년~1997년 삼성전기 종합 연구소 수석연구원. 1997년~현재 서울과학기술대 전기정보공학과 교수. 당 학회 국제이사.