

적은 소자수를 갖고 전해커패시터가 없는 단일단 인터리브드 토템폴 전기자동차 탑재형 충전기

김병우, 조우식, 최세완[†]

A Reduced Component count Single-stage Electrolytic Capacitor-less Interleaved Totem-pole On-board Battery Charger

Byeong-Woo Kim, Woo-Sik Cho, and Se-Wan Choi[†]

Abstract

This paper proposes a single-stage interleaved totem-pole on-board battery charger with a simple structure and a reduced component count. Apart from achieving ZVS turn-on of all switches and ZCS turn-off of all diodes, this charger does not require an input filter due to its CCM operation and bulky electrolytic capacitors, which in turn result in a high power density. A single-stage power conversion technique is applied to the interleaved structure in order to achieve a high power density and high efficiency. A 2.5 kW prototype of the proposed charger is also built and tested to validate the proposed operation.

Key words: On-board battery charger, Single-stage, Soft switching, Totem-pole, Electrolytic capacitor-less

1. 서 론

연비 및 온실가스 배출 감소를 위해 전기자동차와 플러그인 하이브리드 전기자동차 기술에 대한 관심이 점차 증가하고 있다. 전기자동차 및 플러그인 하이브리드 전기자동차의 주행거리 연장을 결정하는 핵심 부품으로 간주되는 전기자동차 탑재형 충전기는 제한된 부피와 높은 연비에 따라 높은 효율, 높은 전력밀도, 저가격 및 저부피가 요구된다^[1].

일반적으로 전기자동차 탑재형 충전기는 입력 역률보상을 위한 PFC (Power Factor Correction) 컨버터와 배터리의 충전 전류 및 전압을 제어하는 절연형 DC-DC 컨버터로 구성되는 2단 방식의 구조로 이루어져 있다^{[2]-[3]}. 2단 방식의 전기자동차 탑재형 충전기는 넓은 출력 조정 및 높은 역률을 갖는 장점이 있지만 2단 방식

의 전기자동차 탑재형 충전기는 2단 전력변환 구조로 인해 효율에 제한이 있으며 소자의 수가 많아 저가격이 어려운 단점이 있다.

이러한 이유로 PFC 회로와 절연형 DC-DC 컨버터의 스위치단이 결합된 단일단 방식의 AC-DC 컨버터가 제안되었다^{[4]-[7]}. 소용량을 위한 플라이백과 포워드 컨버터로 구성된 단일단 구조는 더 높은 효율과 저가격을 기대할 수 있지만 이러한 구조는 변압기의 저주파 성분으로 인해 용량 증대에 따라 코어부피 및 손실이 증가하여 전기자동차 충전기 응용에 적합하지 않다.

이러한 문제점을 극복하기 위해 다른 구조의 단일단 전기자동차 탑재형 충전기가 제안되었다^{[8]-[9]}. 일반적으로 전기자동차용 충전기에는 전해커패시터가 사용되는데, 전해커패시터는 짧은 수명과 부피가 크기 때문에 전기자동차 응용에는 적절하지 않다^[10]. 이러한 이유로 제안된 충전기는 전해커패시터를 제거하고 필름커패시터를 사용하여 배터리에 정현파 전류로 충전하는 특징을 갖는다. 하지만 입력 전류가 DCM (Discontinuous Conduction Mode) 동작을 하여 높은 피크전류를 갖기 때문에 용량증대에 따라 도통손실이 매우 커져 효율에 제한적인 단점이 있어 대용량 응용에 적합하지 않다.

본 논문에서는 적은 소자수를 갖는 무전해커패시터 단일단 인터리브드 토템폴 전기자동차 탑재형 충전기를 제안한다. 제안하는 전기자동차 탑재형 충전기는 토템폴

Paper number: TKPE-2017-22-6-6

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

Manuscript received Jun. 3, 2017; revised Jun. 26, 2017; accepted Nov. 6, 2017

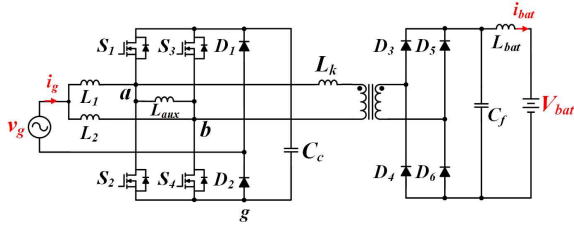


Fig. 1. Proposed on-board battery charger.

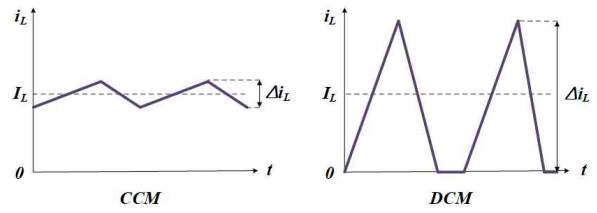


Fig. 2. Inductor waveforms in CCM and DCM.

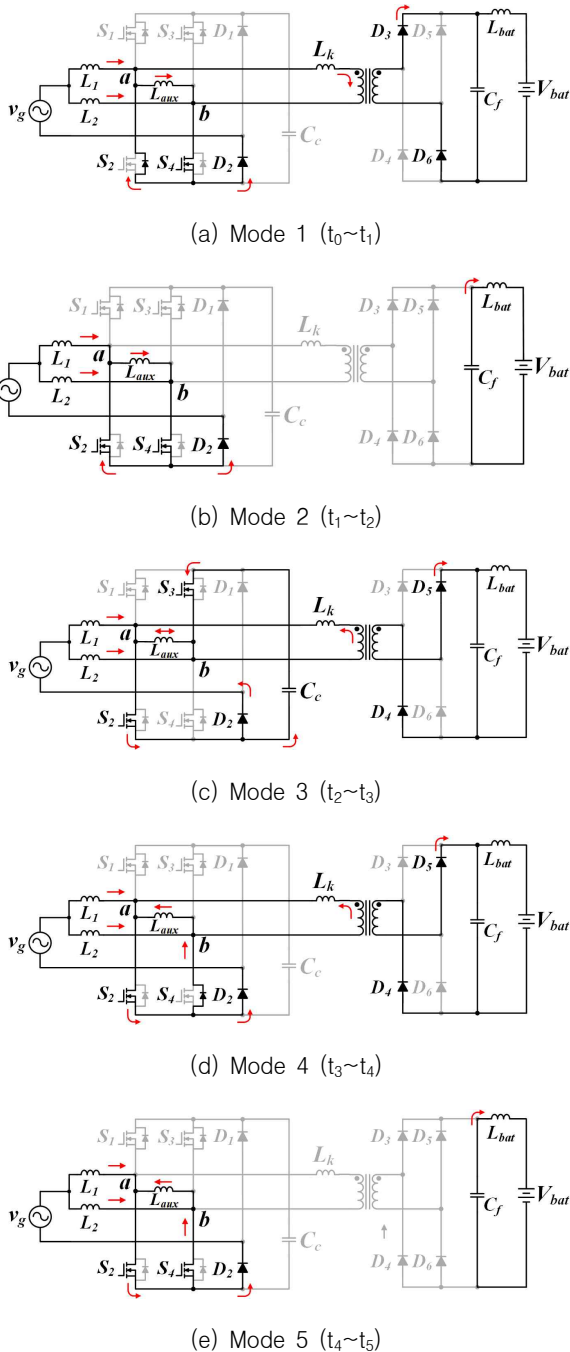


Fig. 3. Operation states of the proposed on-board battery charger.

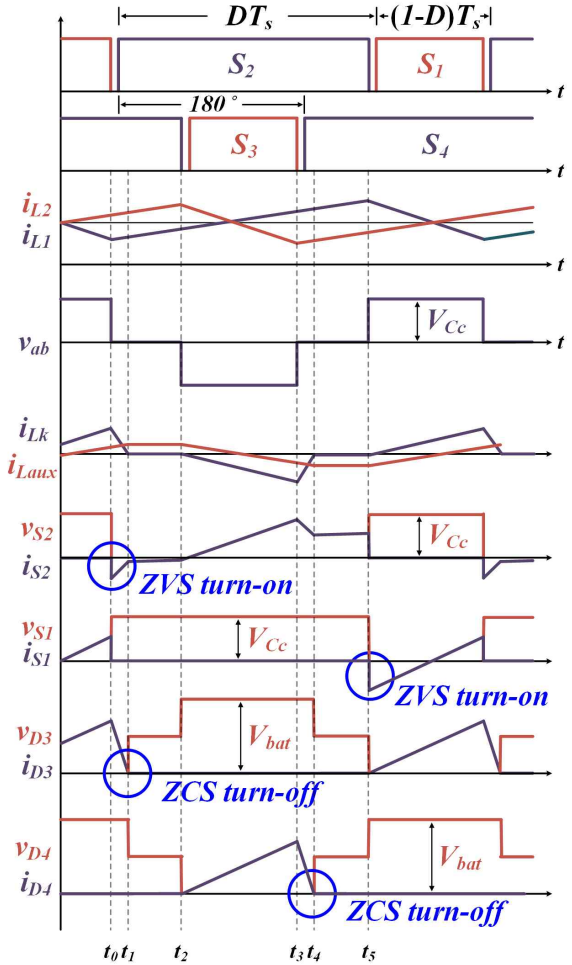


Fig. 4. Operational waveform of the proposed on-board battery charger.

구조에 인터리빙 회로를 적용하고 소자의 수를 최소화하여 4개의 스위치만으로 역률제어 및 배터리 충전을 수행하며 CCM (Continuous Conduction Mode)으로 동작한다. 기존의 DCM 동작을 하는 단일단 충전기에 비해 인덕터의 전류 리플이 작아 스위치의 도통손실이 감소되는 이점이 있으며 넓은 전압 및 부하영역에서 스위치의 ZVS (Zero Voltage Switching)턴 온 및 다이오드의 ZCS (Zero Current Switching)턴 오프를 성취하여 고효율을 달성 할 수 있다. 또한 전해커패시터를 제거하고 필름커패시터를 사용하여 내구성도 높고 인터리빙효

과로 요구되는 입력 필터의 부피가 감소되어 높은 전력 밀도를 달성 할 수 있다. 2.5kW급 시작품을 제작하여 제안하는 단일단 충전기의 타당성을 검증하였다.

2. 제안하는 전기자동차 탑재형 충전기

제안하는 단일단 전기자동차 탑재형 충전기는 그림 1과 같다. 제안하는 충전기는 단일단 브리지리스 구조로 변압기 1차 측에 토탐폴 다이오드 $D_1 \sim D_3$ 입력 필터 인덕터 L_b , L_2 스위치 $S_1 \sim S_4$ 클램프 커패시터 C_c 와 변압기 2차 측에 정류 다이오드 $D_3 \sim D_6$ 으로 구성되어 있다. 제안하는 충전기는 듀티를 조절하여 입력 역률 보상, 배터리 충전 전류 및 전압을 제어한다. 스위치 S_1 과 S_3 , S_2 와 S_4 는 상보적으로 동작하고 180도 위상차를 갖기 때문에 입력 필터에 인터리빙 효과를 갖는다. 또한 스위치의 ZVS 턴온 및 다이오드의 ZCS 턴오프를 성취한다.

2.1 스위칭 동작원리

그림 3은 제안하는 충전기의 스위칭 한 주기의 동작 원리를 나타내며 그림 4는 그에 따른 동작파형을 나타낸다. 동작원리에 앞서 입력 전압이 양의 값일 때 해석을 진행하며 C_c 와 C_n 는 전압원이라 가정하여 한 주기 T_s 동안 일정한 상수 값으로 본다. S_1 , S_2 와 S_3 , S_4 는 180도 위상차를 가지며 동일한 동작을 하기 때문에 S_1 , S_2 로 주요 동작을 설명한다.

Mode 1 ($t_0 \sim t_1$): S_1 이 턴오프되면서 모드 1이 시작된다. i_{Lk} 는 일정한 기울기로 감소하며 식 (1)과 같이 얻을 수 있다.

$$i_{Lk}(t) = -\frac{V_{bat}}{nL_k}(t-t_0) + i_{Lk}(t_0) \quad (t_0 < t < t_1) \quad (1)$$

i_{Lk} 와 I_{Ll} 의 차가 S_2 에 흐르며 ZVS 턴온을 한다. i_{Lk} 가 i_{Lm} 과 같아지면서 D_3 , D_6 이 ZCS 턴오프하고 모드 1이 종료된다.

Mode 2 ($t_1 \sim t_2$): L_k 와 L_m 에는 일정한 전류가 흐르며 S_4 가 턴오프되면서 D_3 , D_6 에는 각각 출력 전압의 절반이 걸리게 되며 다음 모드로 넘어간다.

Mode 3 ($t_2 \sim t_3$): S_4 가 턴오프되어 L_k 에 일정 전압이 걸려 전류가 감소하며 식 (2)와 같이 얻을 수 있다.

$$i_{Lk} = \frac{(V_{bat}/n - V_{Cc})}{L_k}(t-t_2) + i_{Lk}(t_2) \quad (t_2 < t < t_3) \quad (2)$$

i_{Lk} 가 감소됨에 따라 D_4 는 턴온을 하며, L_m 에는 배터리

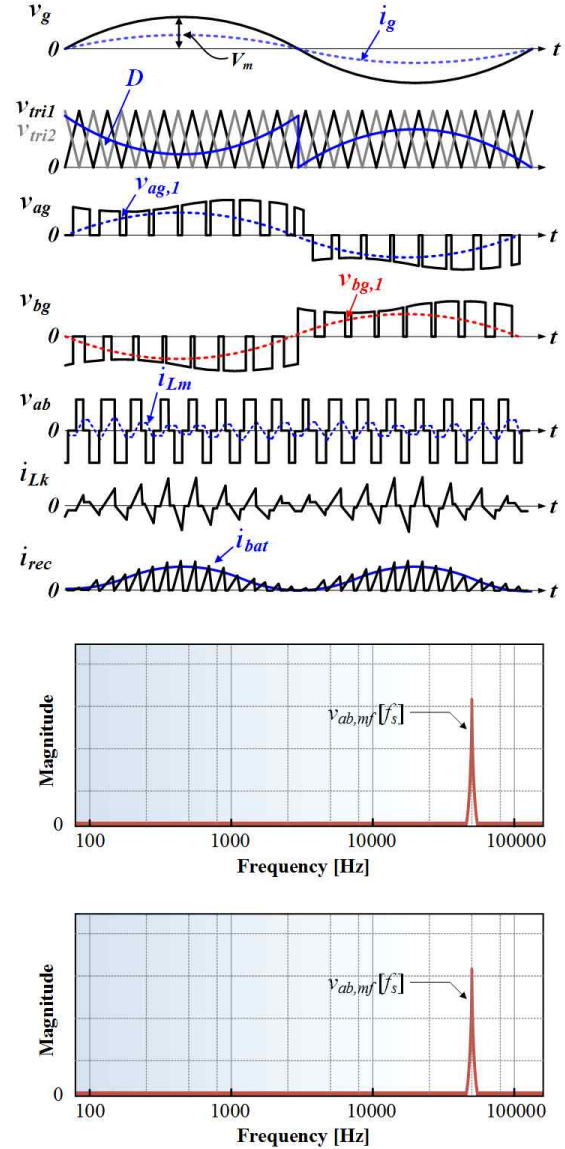


Fig. 5. Key waveform and FFT of the proposed on-board battery charger.

전압이 걸려 전류가 일정한 기울기로 감소한다. S_3 가 턴오프되면 다음 모드로 넘어간다.

Mode 4 ($t_3 \sim t_4$): S_3 가 턴오프되어 L_k 에 출력 전압 전압이 걸려 전류가 감소하며 i_{Lk} 는 식 (3)과 같이 얻을 수 있다.

$$i_{Lk}(t) = -\frac{V_{bat}}{nL_k}(t-t_3) + i_{Lk}(t_3) \quad (t_3 < t < t_4) \quad (3)$$

i_{Lk} 가 감소하다가 i_{Lm} 과 같아지면서 다음 모드로 넘어간다.

Mode 5 ($t_4 \sim t_5$): L_k 와 L_m 에는 일정한 전류가 흐르며 S_2 이 턴오프되면서 현재 모드가 종료된다. 나머지 동작은 스위치가 대칭으로 동작하여 반복되기 때문에 생략한다.

2.2 주요 동작원리

그림 5는 제안하는 단일단 전기자동차 탑재형 충전기의 충전 동작원리 및 변압기와 충전전류의 FFT 파형을 나타낸다. 각 스위치 S1, S2 와 S3, S4는 입력 필터 감소를 위해 인터리빙 동작을 하는데, 180도 위상차를 갖는 2개의 캐리어와 레퍼런스 신호를 이용하여 만든 게이트 신호로 각 스위치가 동작한다. 제안하는 충전기는 이러한 게이트 신호로 입력 역률과 출력 전압 및 전류를 제어하게 되며, 이에 따라 C_c 에 일정한 DC 전압과 120Hz 전압이 형성된다. 이 전압이 스위칭을 통해 V_{ag} , V_{bg} 를 형성하며 V_{ag} , V_{bg} 는 2차, 4차등 짝수 차수 성분과 스위칭 성분을 가진다. 변압기를 a와 b노드에 연결하면 V_{ab} 는 고주파 성분으로 동작하며 V_{ab} 와 V_{sec} 의 전압으로 i_{Lk} 전류가 형성된다. 그에 따라 배터리 전류는 정현파 전류로 DC 성분과 120Hz의 성분을 갖게 된다.

2.3 전압전달비

제안하는 차량탑재형 충전기의 전압전달비는 입력 측 인덕터 평균전압과 누설 인덕터 평균 전압 그리고 누설 인덕터 전류의 피크 값을 이용하여 얻을 수 있다. 또한, 입력은 양전압인 상황이고 출력은 저항부하로 가정하였으며 자화 인덕터 전류는 0으로 가정하였다. 입력 측 인덕터의 평균전압이 0임을 이용하면 입력 전압과 클램프 커패시터의 관계식은 다음과 같다.

$$V_g D = (V_{Cc} - V_g)(1 - D) \quad (1)$$

$$\frac{V_{Cc}}{V_g} = \frac{1}{1 - D} \quad (2)$$

클램프 커패시터와 배터리 전압의 관계식을 구하기 위해 누설 인덕터의 평균전압이 0임을 이용하면 다음과 같다.

$$\frac{V_{Cc} - n V_{bat}}{L_{Lk}} D_r = \frac{n V_{bat}}{L_{Lk}} D_f \quad (3)$$

여기서 n 은 변압기의 턴비를 나타낸다. i_{rec} 의 피크 값과 배터리 전류의 관계식 및 누설 인덕터 전류의 관계식은 다음과 같다.

$$I_{Lk,peak} = \frac{I_{bat}}{n} \frac{1}{D_r + D_f} \quad (4)$$

$$I_{Lk,peak} = \frac{V_{Cc} - n V_{bat}}{L_{Lk}} D_r T_s \quad (5)$$

식 (3), (4), (5)로부터 전압전달비를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{V_{bat}}{V_g} = \frac{D_r^2 R_{bat}}{2 L_{Lk} f_s (1 - D)} \left(\sqrt{n^2 + \frac{L_{Lk} f_s}{D_r^2 R_{bat}}} - n \right) \quad (6)$$

$$where \begin{cases} D_r = D & (D < 0.5) \\ D_r = 1 - D & (D > 0.5) \end{cases}$$

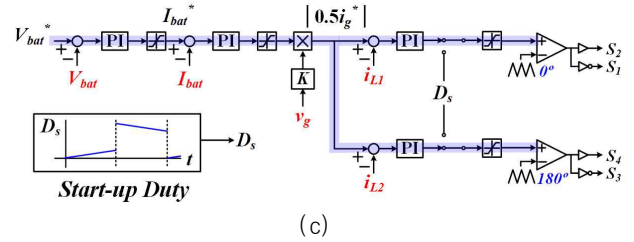
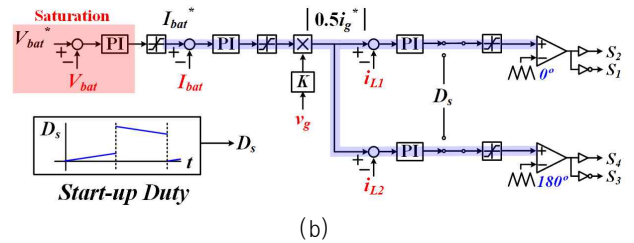
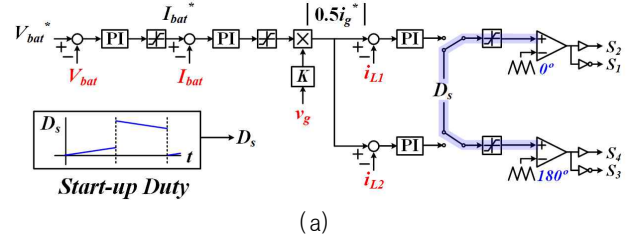


Fig. 6. Operating modes of the control algorithm with start-up block. (a) Start-up Mode. (b) CC Mode. (c) CV Mode.

2.4 제어 알고리즘

제안하는 충전기의 제어 알고리즘은 배터리의 CC-CV를 위한 PI 제어기, 입력 역률 제어를 위한 PI 제어기 및 초기동작을 위한 스타트업 듀티를 출력하는 블록으로 구성되어 있으며 그림 6과 같고 초기동작 파형은 그림 7과 같다. 제안하는 충전기의 스타트업 모드는 초기 구동 시 입력 전압과 커패시터로 인해 발생하는 큰 돌입전류와 제어기 동작 시 발생하는 과도상태를 방지하기 위해 입력 전압을 센싱하여 영전압인 상황을 한번 검출한 뒤에 영전압인 상태에서 스타트업 동작을 시작하며 그에 따른 모드는 그림 6(a)와 같다. 스타트업 듀티를 적용하여 듀티를 서서히 증가시켜 C_c 를 충전함과 동시에 L_k 의 과도상태를 없애고 출력 전압과 i_{Lk} 를 서서히 증가시킨다. 이에 따라 출력 전압이 정상상태에 거의 도달하면 출력 전압과 역률보상 제어를 수행한다. 전류제어 모드는 그림 6(b)와 같으며 정상상태 동작에서 배터리의 전압이 낮을 때 전압제어기가 포화되어 리미터에 설정된 값인 일정한 전류 지령치로 전류제어와 입력 역률보상 제어를 수행한다. 배터리가 대부분 충전되면 전압제어기에서 나오는 전류 지령치가 서서히 감소

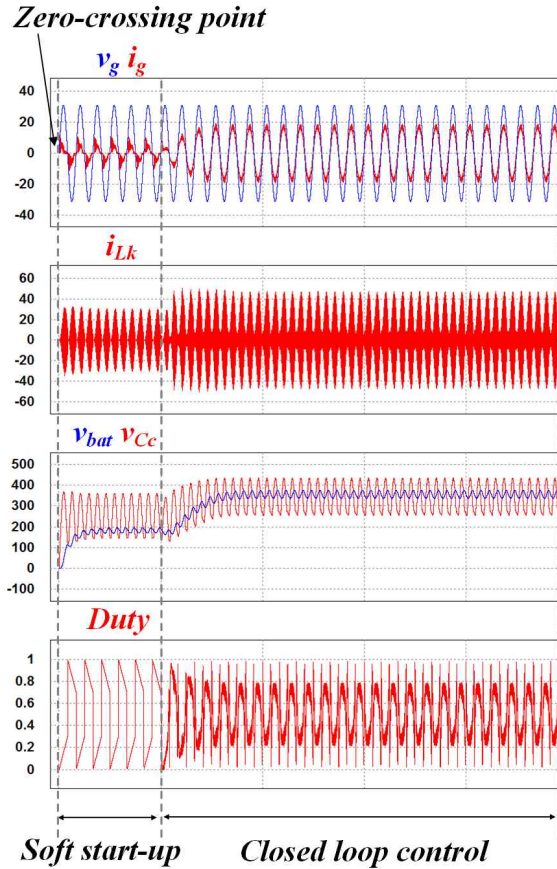


Fig. 7. Start-up waveform of the proposed on-board battery charger.

되며 전압제어를 수행하며 그에 따른 모드는 그림 6(c)와 같다.

2.5 영전압 스위칭 조건

그림 8과 그림 9는 부하상항과 보조 인덕터 L_{aux} 의 값에 따라 각 스위치가 켜질 때의 전류를 나타낸 그림이다. 이때 출력 전압은 일정하며 입력 전압과 입력 전류가 가장 큰 값일 때의 상황으로 모의실험을 통해 도식화하였다. 스위치 S1은 상측 스위치이며 스위치 S2는 하측에 위치한 스위치이다. 스위치의 영전압 스위칭 조건을 결정하는 요소는 부하의 크기 및 보조 인덕턴스 값이다. 부하가 큰 경우 모든 스위치의 영전압 스위칭 범위는 늘어나게 되고, 보조 인덕턴스의 값이 감소함에 따라 상측 스위치의 범위는 거의 비슷하지만 하측 스위치의 범위는 넓어진다. 이에 따라 보조 인덕터를 설계하여 모든 부하 및 전압범위에서 영전압 스위칭을 성취할 수 있다.

4. 실험결과

제안하는 단일단 토탈폴 충전기는 성능 검증을 위해 아래의 사양으로 시작품을 제작하였다. 제어기는 DSP

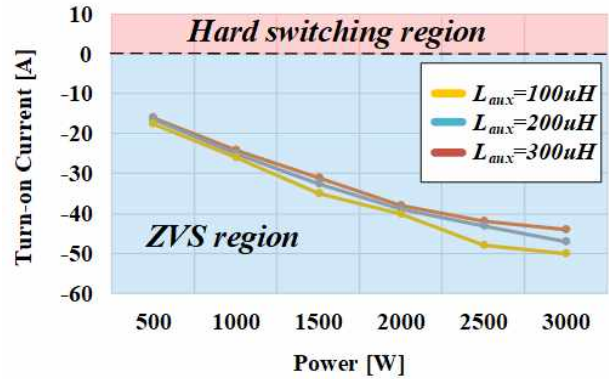


Fig. 8. Turn-on currents of switch S1 depending on output power at positive half-cycle.

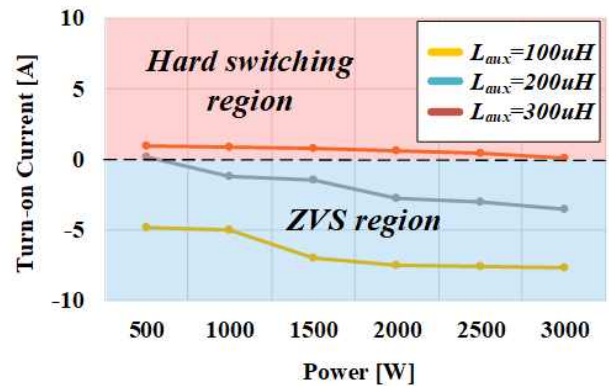
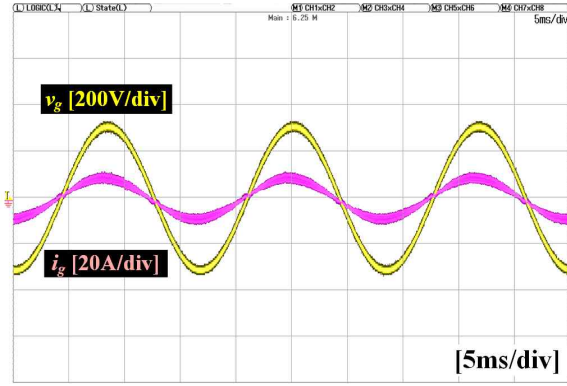


Fig. 9. Turn-on currents of switch S2 depending on output power at positive half-cycle.

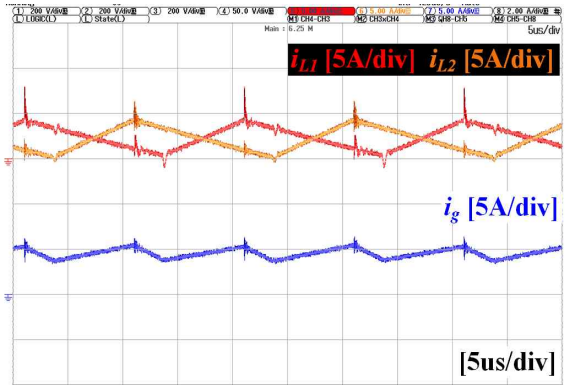
TABLE I
COMPARISON OF DIFFERENT TOPOLOGIES

Parameter	Symbol	Value	Unit
Output power	P_o	2500	W
Input voltage	V_g	220	VAC
Output voltage	V_{bat}	400	V
Clamp capacitance	C_C	20	μF
Switching frequency	f_s	50	kHz
Input inductance	L_1, L_2	420	μH
Turn ratio	$N_1:N_2$	1:1.2	turn
Leakage inductance	L_k	15	μH
Auxiliary inductance	L_{aux}	150	μH

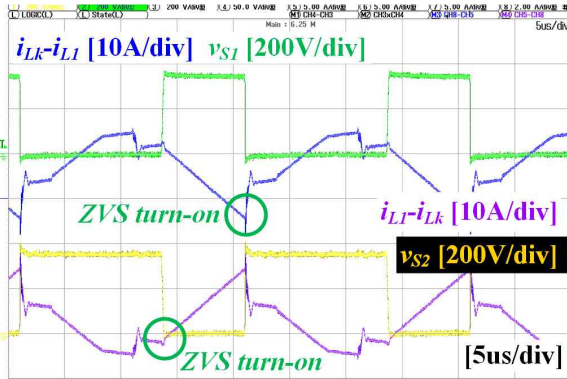
기반의 디지털제어기로 TI사의 TMS320F28335를 사용



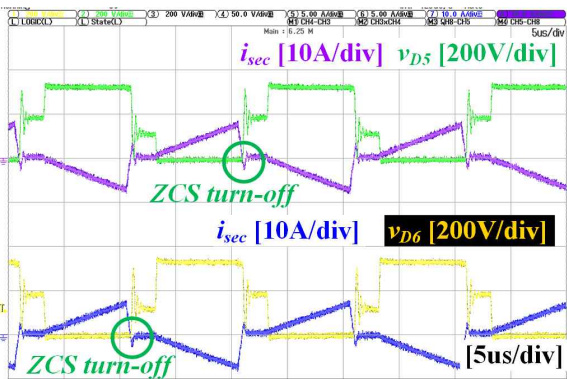
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 10. Experimental waveforms of the proposed on-board charger.

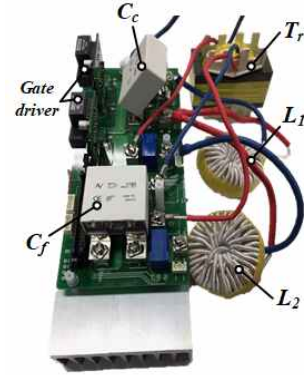
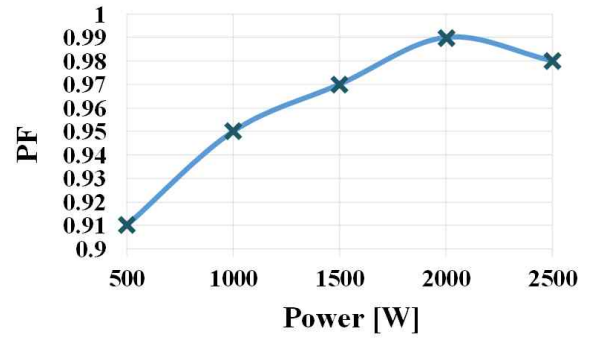
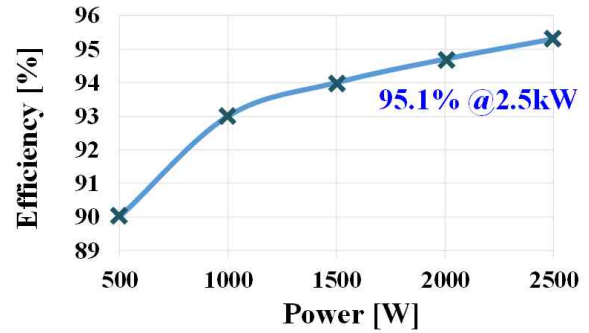


Fig. 11. 2.5kW prototype of the proposed on-board battery charger.



(a) PF



(b) Efficiency

Fig. 12. Measured power factor and efficiency.

하였으며 설계에 사용된 주요 파라미터는 표 1과 같다. 그림 10은 실험 파형이며 그림 10(a)는 정상상태의 입력 전류, 입력 전압 파형으로 높은 역률을 가지는 것을 확인 할 수 있다. 그림 10(b)는 입력 전류와 인덕터의 전류파형을 나타내며 인터리빙 효과로 입력 전류의 리플이 감소한 것을 확인 할 수 있다. 그림 10(c)는 상측 스위치와 하측 스위치의 전압 및 전류 파형으로 각 스위치가 내부다이오드로 도통할 때 스위칭을 하므로 ZVS 턴온 성취를 확인할 수 있다. 그림 10(d)는 2차 측 다이오드의 전압 및 전류 파형으로 각 다이오드가 기울기를 갖고 턴오프를 하므로 ZCS 턴오프 성취를 확인할 수

있다. 그림 11은 방열판과 PCB, 필름 커패시터, 인덕터와 고주파변압기로 구성된 2.5kW 시작품 사진이다. 그림 12는 YOKOGAWA 사의 WT3000을 이용하여 측정한 역률 및 효율이다. 그림 12(a)는 제안한 컨버터의 역률로 0.98을 달성하였으며 그림 12(b)는 제안한 컨버터의 효율로 최고효율 및 정격효율 95.1%를 달성하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 적은 소자수를 갖는 무전해커패시터 단일단 인터리브드 토탐폴 전기자동차 탑재형 충전기를 제안한다. 제안하는 전기자동차 탑재형 충전기는 토탐폴 구조에 인터리빙 회로를 적용하여 소자의 수를 최소화하여 역률제어 및 배터리 충전을 수행하며 CCM으로 동작하여 리플이 작아 입력 필터의 부피 및 도통손실이 감소되는 이점이 있으며 넓은 전압 및 부하영역에서 스위치의 ZVS 턴 온 및 다이오드의 ZCS 턴 오프를 성취하여 고효율을 달성 할 수 있다. 또한 전해커패시터를 제거하고 필름커패시터를 사용하여 높은 내구성 및 전력밀도를 달성 할 수 있다. 2.5kW급 시작품을 통해 제안하는 충전기의 타당성을 검증하였고 정격사양에서 각각 역률은 0.98 효율은 95.3%를 달성하였다.

이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2017R1A2A05001054)

References

- [1] J. C. Gomez and M. M. Morcos, "Impact of EV battery chargers on the power quality of distribution systems," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 18, No. 3, pp. 975-981, July 2003.
- [2] M. Yilmaz and P. T. Krein, "Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 28, No. 5, pp. 2151-2169, May 2013.
- [3] D. S. Gautam, F. Musavi, M. Edington, W. Eberle and W. G. Dunford, "An automotive onboard 3.3-kW battery charger for PHEV application," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 61, No. 8, pp. 3466-3474, Oct. 2012.
- [4] J. E. Yeon, J. B. Jeong, H. J. Kim. "Single stage boost input type resonant AC-DC converter," *The Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 9, No. 1, pp. 65-72, Feb. 2004.
- [5] B. S. Kim, I. H. Lim, J. H. Lee, H. S. Ryu, and B. H. Kwon, "A single-stage single-switch flyback converter with synchronous rectifier," *The Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 11, No. 4, pp. 361-370, Aug. 2006.
- [6] J. M. Kwon, W. Y. Choi and B. H. Kwon, "Single-stage quasi-resonant flyback converter for a cost-effective PDP sustain power module," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 6, pp. 2372-2377, June 2011.
- [7] H. Bodur, K. Y. Kaya, E. Akboy and I. Aksoy, "A new forward-flyback based single switch single stage PFC converter," *2015 IEEE 6th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, Aachen, pp. 1-3, 2015.
- [8] S. Li, J. Deng and C. C. Mi, "Single-stage resonant battery charger with inherent power factor correction for electric vehicles," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 62, No. 9, pp. 4336-4344, Nov. 2013.
- [9] J. Y. Lee, Y. D. Yoon and J. W. Kang, "A single-phase battery charger design for LEV based on DC-SRC with resonant valley-fill circuit," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 62, No. 4, pp. 2195-2205, April 2015.
- [10] K. M. Yoo, K. D. Kim and J. Y. Lee, "Single-and three-phase PHEV onboard battery charger using small link capacitor," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 60, No. 8, pp. 3136-3144, Aug. 2013.
- [11] E. Alidori, G. Cimini, G. Ippoliti, G. Orlando and M. Pirro, "A passivity-based solution for CCM-DCM boost converter Power Factor Control," *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Vienna, pp. 7752-7757, 2013.
- [12] S. Y. Yun, H. J. Chae, W. Y. Kim, H. T. Moon, Y. S. Jeong, and J. Y. Lee. "Battery charger for EV," *The Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 15, No. 6, pp. 460-465, Dec. 2010.



김병우(金丙宇)

1990년 9월 15일생. 2014년 서울과학기술대 전기정보공학과 졸업. 2016년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2016년~현재 동 대학원 전기정보공학과 박사과정.



조우식(趙禹植)

1990년 1월 25일생. 2017년 서울과학기술대 전기정보공학과 졸업. 2017년~현재 동 대학원 전기정보공학과 석사과정.



최세완(崔世琬)

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