

전해커패시터가 없고 적은 소자수를 갖는 단일단 인터리브드 전기자동차용 충전기

김민재¹, 김병우², 정범교², 최세완[†]

A Single-stage Interleaved Electrolytic Capacitor-less EV Charger with Reduced Component Count

Min-Jae Kim¹, Byeong-Woo Kim², Bum-Kyo Jung², and Se-Wan Choi[†]

Abstract

This paper proposes a single-stage interleaved soft-switching electrolytic capacitor-less EV charger with reduced component count and simple circuit structure. The proposed charger achieves ZVS turn-on of all switches and ZCS turn-off of all diodes without regard to voltage and load variation. It achieves high power density even without an input filter due to CCM operation and bulky electrolytic capacitors and without a low-frequency component in the transformer. A 2 kW prototype of the proposed charger with sinusoidal charging is built and tested to verify the validity of the proposed operation.

Key words: On-board battery charger, EV charger, Single-stage, Soft switching, High frequency transformer, Electrolytic capacitor-less

1. 서 론

전기자동차의 보급이 확대됨에 따라 충전 인프라 구축에 대한 수요가 점차 증가하고 있다. 이에 따라 정부 주도하에 충전 인프라 공급 및 보조금 지급이 활성화되며 렌터카, 전기택시, 전기버스 등의 전기자동차 공급이 증가하고 있다. 전기자동차용 충전기는 전기자동차의 운행거리와 연비를 결정하는 중요한 부품이다^[1].

일반적으로 전기자동차용 충전기는 입력 역률과 직류링크단 전압을 일정하게 제어하는 PFC와 배터리의 CC-CV 충전 제어를 하는 절연형 DC-DC 컨버터로 구성된 2단방식이 사용된다^[2]. 역률보상을 위한 PFC로

부스트 PFC가 주로 사용되며 절연형 DC-DC 컨버터는 넓은 출력전압을 제어하기 위해 다양한 토폴로지가 사용된다^{[3],[4]}. 가장 많이 사용되는 절연형 DC-DC 컨버터로는 위상변조 풀브리지 컨버터가 있지만 순환전류와 출력 다이오드의 높은 전압정격으로 인해 적합하지 않다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 LLC 공진형 컨버터가 활발히 연구되었으며 스위치와 다이오드의 소프트스위칭, 낮은 출력다이오드 전압정격 등의 장점을 가지고 있다. 하지만 2단 방식의 전기자동차용 충전기는 소자수가 많아 저가격이 어렵고 2단 전력변환 구조로 높은 효율을 기대하기 어렵다. 이를 극복하기 위해 PFC의 스위치와 절연형 DC-DC 컨버터의 스위치를 공유하는 단일단 방식을 고려할 수 있다. 기존의 단일단 충전기는 주로 DCM 방식으로 소자수가 적고 효율이 높은 플라이백과 포워드 컨버터가 제안되었다^{[5]-[8]}. 하지만 변압기의 저주파 성분으로 인해 용량이 증가하면 코어부피 및 손실이 증가하여 대용량 응용에는 적합하지 않다. 또한 고주파동작을 하는 변압기를 사용하는 단일단 충전기^{[9],[10]}는 전해커패시터 대신에 필름 커패시터를 사용하여 정현파충전을 함으로써 높은 전력밀도를 달성하였으나 DCM 동작으로 높은 피크전류 때문에 도통손실이 크며 소자수가 많아 효율에 제한적인 단점이 있다.

Paper number: TKPE-2017-22-3-1

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. Technology Research Institute New Power Plasma co., Ltd.

² Dept. of Electrical & Information Eng., Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

Manuscript received Oct. 31, 2016; revised Nov. 16, 2016; accepted Dec. 31, 2016

— 본 논문은 2016년 전력전자학술대회 우수추천논문임

— 본 논문은 2016년 전력전자학술대회 외부장학금 수혜논문임

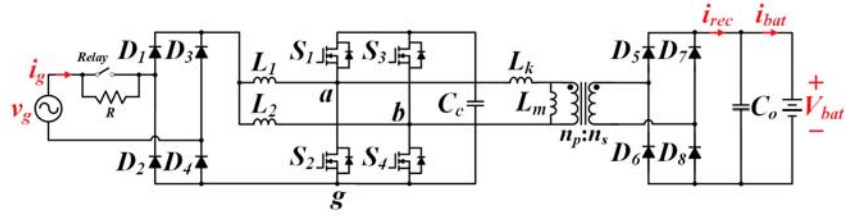


Fig. 1. Proposed single-stage interleaved electrolytic capacitor-less EV charger.

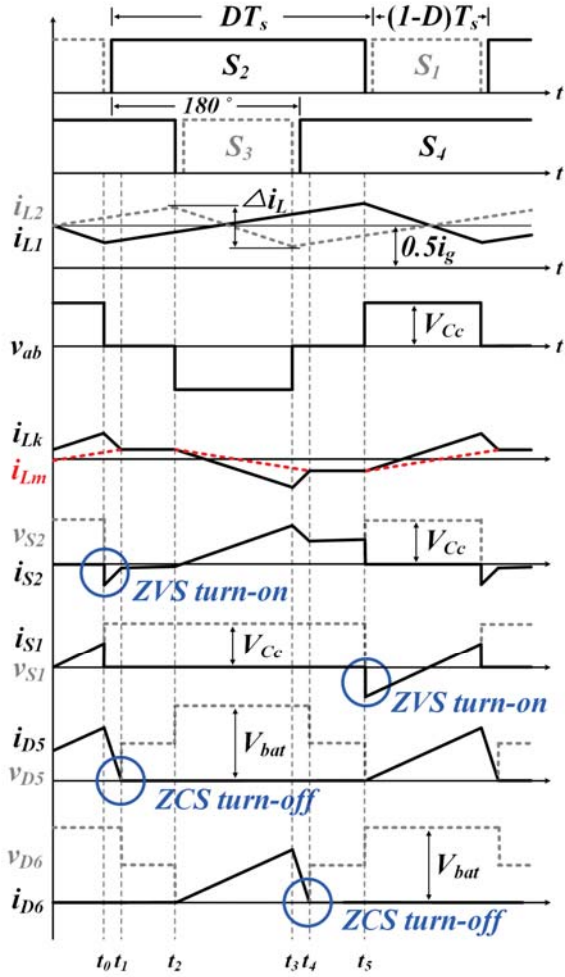


Fig. 2. Operational waveform of the proposed EV charger.

본 논문에서는 단일단 인터리브드 소프트스위칭 전기자동차용 충전기를 제안한다. 제안하는 충전기는 변압기의 저주파 성분을 완전히 제거하여 코어부피 및 손실을 최소화하였고 4개의 스위치를 이용하여 역률제어 및 배터리 충전을 수행하며 CCM으로 동작하여 기존의 DCM 동작에 비해 리플이 작아 도통손실이 감소되어 기존 단일단의 단점을 극복하였다. 또한 전해커패시터를 제거하고 필름커패시터를 사용하여 정현파 충전을 함으로써 내구성이 높고 인터리빙효과로 요구되는 입력필터의 부피가 감소되어 높은 전력밀도를 달성할 수 있다. 또한 리튬이온 배터리에 주입되는 저주파

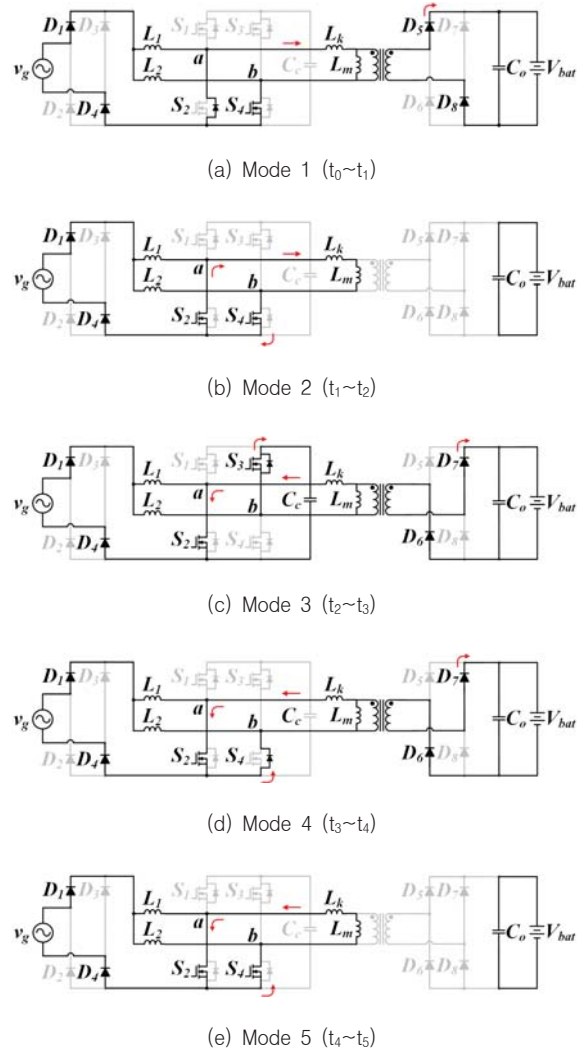


Fig. 3. Operation states of the proposed EV charger.

전류는 배터리 수명과 온도에 큰 영향을 미치지 않는다^[11]. 제안하는 단일단 충전기는 넓은 동작영역에서 스위치의 ZVS 턴 온 및 다이오드의 ZCS 턴 오프를 성취한다. 2kW급 시작품을 제작하여 제안하는 단일단 충전기의 타당성을 검증하였다.

2. 제안하는 전기자동차용 충전기

제안하는 전기자동차용 충전기는 그림 1과 같다. 제

안하는 충전기는 단일단 구조로 변압기 1차측에 다이오드 정류기 $D_1 \sim D_4$, 입력 필터 인덕터 L_1 , L_2 , 스위치 $S_1 \sim S_4$, 클램프 커패시터 C_c 와 변압기 2차측에 정류 다이오드 $D_5 \sim D_8$ 로 구성되어있다. 제안하는 충전기는 듀티를 조절하여 출력을 제어한다. 스위치 S_1 과 S_2 , S_3 와 S_4 는 상보적으로 동작하고 180도 위상차를 갖기 때문에 입출력 필터에 인터리빙 효과를 갖는다. 제안하는 충전기의 변압기는 인터리빙 회로와 스위칭 기법을 통해 변압기의 저주파를 완전히 상쇄시켜 고주파 성분만 갖는다. 또한 스위치의 ZVS 턴 온 및 다이오드의 ZCS 턴 오프를 성취한다.

2.1 동작원리

그림 2는 제안하는 충전기의 동작파형이며 그림 3은 동작원리를 나타내었다. 동작원리에 앞서 입력전압이 양의 값일 때 해석을 진행하며 C_c 와 C_o 는 전압원이라 가정하여 한주기 T_s 동안 일정한 상수 값으로 본다. S_1 , S_2 와 S_3 , S_4 는 180도 위상차만 가지며 동일한 동작을 하기 때문에 S_1 , S_2 로 주요 동작을 설명한다.

Mode 1 ($t_0 \sim t_1$): S_1 가 턴 오프되면서 이 모드가 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_{L1} 의 차가 S_2 에 흐르며 ZVS 턴 온을 한다. i_{Lk} 가 i_{Lm} 과 같아지면서 D_5 , D_8 이 ZCS 턴 오프하고 이 모드가 종료된다.

Mode 2 ($t_1 \sim t_2$): L_k 와 L_m 에는 일정한 전류가 흐르며 S_3 가 턴 오프되면서 다음모드로 넘어간다.

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

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

L_m 에는 배터리전압이 걸려 전류가 일정한 기울기로 감소한다. S_3 가 턴 오프되면 다음모드로 넘어간다.

Mode 4 ($t_3 \sim t_4$): L_k 에 출력전압이 걸리면서 i_{Lk} 는 식 (3)과 같이 얻을 수 있다.

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

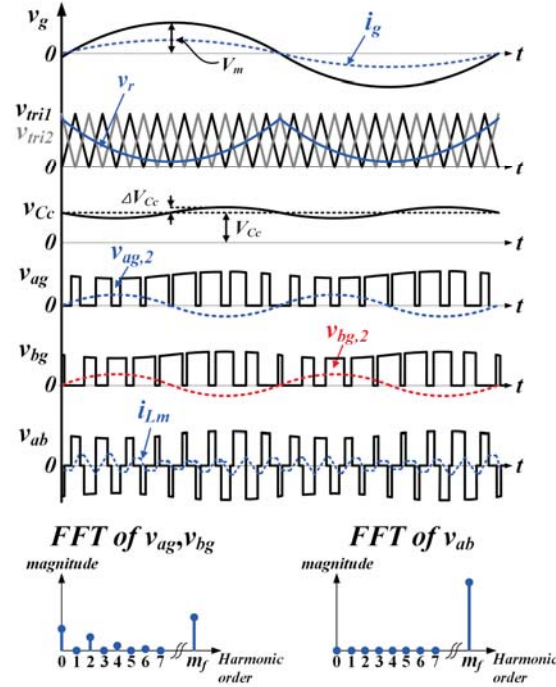


Fig. 4. Key waveform and FFT of the proposed EV charger.

i_{Lk} 가 감소하다가 i_{Lm} 과 같아지면서 다음모드로 넘어간다.

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

스위치 S_1 과 S_2 의 ZVS 전류조건은 각각 식 (4), (5)와 같고, L_k 와 L_m 을 적절히 설계하여 전 부하영역에서 스위치의 ZVS 턴 온을 성취할 수 있다.

$$\left(\frac{V_{Cc} - nV_{bat}}{L_k f_s} + \frac{nV_{bat}}{2L_m f_s}\right)D - \frac{1}{2}I_{L1} + \frac{\Delta i_{L1}}{2} > 0 \quad (4)$$

$$\frac{1}{2}I_{L1} + \frac{\Delta i_{L1}}{2} + \left(\frac{nV_{bat}}{2L_m f_s}\right)D > 0 \quad (5)$$

2.2 변압기 저주파 상쇄 원리

그림 4는 저주파 상쇄 원리를 나타낸다. C_c 에는 일정한 DC성분과 120Hz성분이 존재한다. 게이트 신호를 통해 스위칭하게 되면 v_{ag} 와 v_{bg} 에는 각각 V_{Cc} 의 형태를 갖는 전압이 그림 4와 같이 형성되며, 이 전압에는 DC 성분과 120Hz를 포함한 저주파 성분이 나타나게 되고 v_{ag} 와 v_{bg} 의 각 성분들의 크기는 동일하다. 변압기 1차측 전압은 v_{ag} 와 v_{bg} 의 차로 이루어지기 때문에 식(6)과 같다.

$$v_{ab}(t) = v_{ag}(t) - v_{bg}(t) \quad (6)$$

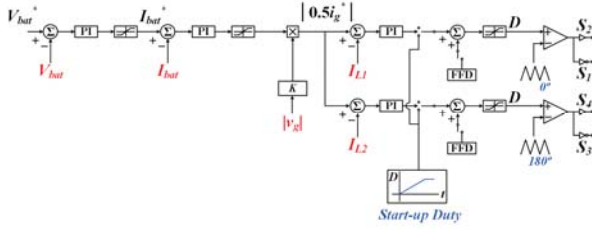


Fig. 5. Control algorithm of the proposed EV charger.

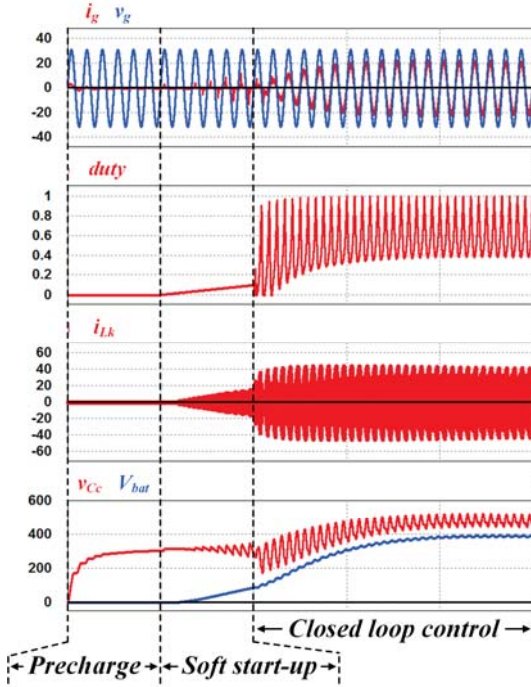


Fig. 6. Start-up operating waveform of the proposed EV charger.

V_{ab} 는 파형은 V_{ag} 와 V_{bg} 의 차로 이루어지기 때문에 같은 크기를 갖는 DC 성분과 120Hz를 포함한 저주파 성분들이 서로 상쇄된다. 그림 4의 FFT 파형을 보면 스위칭 성분만 존재하는 것을 알 수 있다. 이로 인해 변압기의 자화 전류에 저주파 성분은 완전히 제거되어 고주파 성분만 존재하여 변압기 코어의 부피와 손실을 최소화할 수 있다.

2.3 제어 알고리즘

제안하는 충전기의 제어알고리즘은 그림 5와 같다. 배터리의 전압 및 전류제어를 위한 PI 제어기와 역률제어를 위한 PI 제어기로 구성되어있다. 먼저 정상상태 동작에서 배터리 전압이 낮을 때 외부 루프의 전압제어기가 포화되어 항상 일정한 전류 지령치를 생성하여 전류제어와 역률제어를 수행하고, 배터리가 대부분 충전되면 전압제어기에서 나오는 전류 지령치가 서서히 감소하여 전압제어를 수행한다.

스타트업 동작으로는 C_c 를 초기충전하기 위해 그림

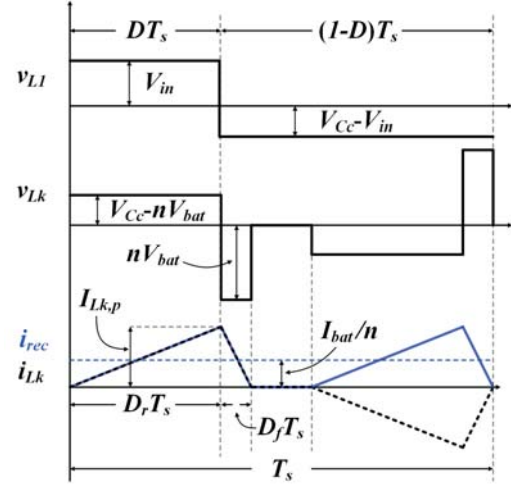


Fig. 7. Inductor voltage waveforms of the leakage and input inductor and current waveforms of the leakage inductor and secondary rectifier.

1과 같이 초충회로를 구성하였다. 초기에 저항을 통해 충전 후에 C_c 전압 충전이 완료되면 릴레이를 턴 온 한다. L_k 의 과도상태를 제거하기 위해 스타트업 듀티를 적용하여 출력전압과 i_{Lk} 를 서서히 증가시킨다. i_{Lk} 가 정상상태의 1/2에 도달하면 제어를 시작하여 출력전압과 역률제어를 수행하며 그에 따른 파형은 그림 6과 같다.

2.4 전압전달비

제안하는 전기자동차용 충전기의 전압전달비는 그림 7의 입력측 인덕터 평균전압과 누설 인덕터 평균전압 그리고 누설 인덕터 전류의 피크값을 이용하여 얻을 수 있다. 또한, 출력은 저항부하로 가정하였으며 자화 인덕터 전류는 0으로 가정하였다. 입력측 인덕터의 평균전압이 0임을 이용하면 입력전압과 클램프 커패시터의 관계식은 다음과 같다.

$$V_{in}D = (V_{C_c} - V_{in})(1-D) \quad (7)$$

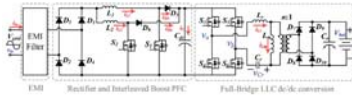
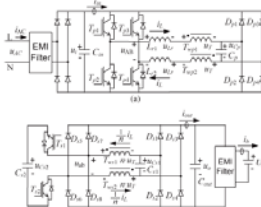
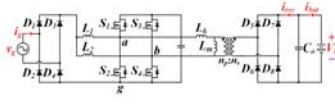
$$\frac{V_{C_c}}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \quad (8)$$

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

$$\frac{V_{C_c} - nV_{bat}}{L_k} D_r = \frac{nV_{bat}}{L_k} D_f \quad (9)$$

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

TABLE I
COMPARISON OF DIFFERENT TOPOLOGIES

		A: Two-stage EV charger ^[3]	B: Single-stage EV charger ^[9]	C: Proposed EV charger
Circuit diagram				
switches		6	6	4
Diodes		10	16	8
soft switching	Switch	PFC : hard switching LLC : ZVS turn-on	ZCS turn-on	ZVS turn-on
	Diode	PFC : hard switching LLC : ZCS turn-off	ZCS turn-off	ZCS turn-off
Current stress (rms)		Low (>8A _{rms})	High (>20A _{rms})	High (>15A _{rms})
Electrolytic capacitors		Yes	No	No
Control method		PFC : duty ratio control LLC : switching frequency control	Fixed duty and quasi-constant switching frequency	Duty ratio control and constant switching frequency
Peak efficiency		Low (>93%)	Low (>93%)	High (>95%)

$$I_{Lk,p} = \frac{I_{bat}}{n} \frac{1}{D_r + D_f} \quad (10)$$

$$I_{Lk,p} = \frac{V_{Cc} - nV_{bat}}{L_k} D_r T_s \quad (11)$$

식 (9), (10), (11)로부터 전압전달비를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{V_{bat}}{V_{\infty}} = \frac{D_r^2 R_{bat}}{2L_k f_s (1-D)} \left(\sqrt{n^2 + \frac{L_k f_s}{D_r^2 R_{bat}}} - n \right) \quad (12)$$

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

3. 비교분석

전기자동차용 충전기는 크게 2단 방식과 단일단 방식으로 분류할 수 있다. 표 1에서 2단 방식의 충전기와 단일단 방식의 충전기를 같은 출력전력에서 비교하였다. A는 기존의 2단 방식의 충전기이며 B는 기존의 단일단 충전기 C는 제안하는 단일단 충전기이다. 기존의 2단 방식은 PFC와 LLC 컨버터가 제어를 따로 수행하여 센서가 많이 필요하며 전해커패시터를 사용하여 부피가 크고 수명이 제한적이다. 하지만 기존의 단일단 방식은 한 대의 컨버터로 고정 듀티와 좁은 범위의 주

파수 제어를 하여 제어가 간단하며 필름커패시터를 사용하여 수명이 높다. 하지만 기존의 2단 방식에 비해 소자수가 많아 효율에 제한적인 단점이 있다. 제안하는 단일단 방식은 한 대의 컨버터로 역률제어와 출력제어를 하며 소자수가 적어 기존의 2단 방식 및 단일단 방식에 비해 저가격과 높은 효율 그리고 높은 전력밀도를 성취할 수 있다. 또한 링크단에 필름커패시터를 사용하여 기존 수명이 높은 장점이 있다.

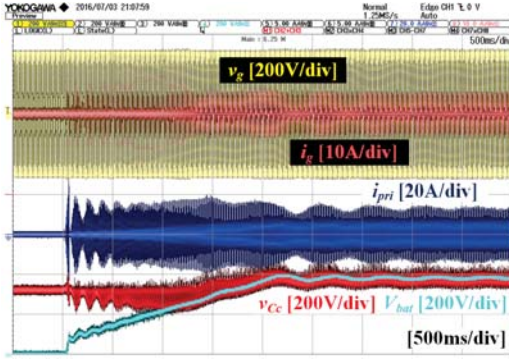
4. 실험결과

제안하는 단일단 충전기는 성능검증을 위해 아래의 사양으로 시작품을 제작하였다. 제어기는 DSP 기반의 디지털제어기로 TI사의 TMS320F28335를 사용하였다.

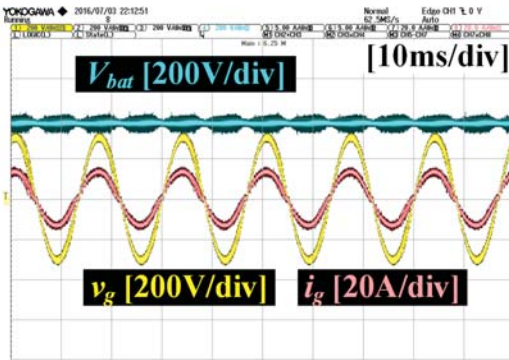
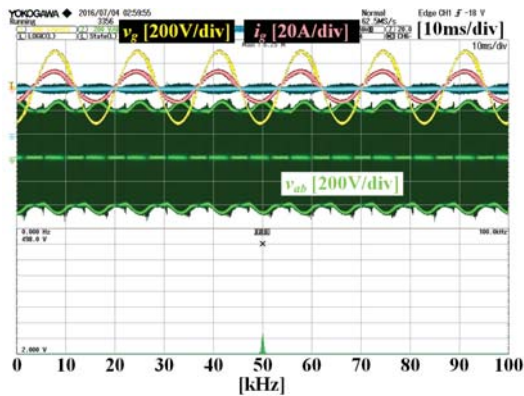
$$\begin{aligned} & \bullet P_o = 2\text{kW} \bullet V_i = 220\text{V}_{AC} \bullet V_o = 400\text{V} \bullet V_{Cc} = 500\text{V} \\ & \bullet n_1 n_2 = 1:1 \bullet L_k = 20\mu\text{H} \bullet L_m = 500\mu\text{H} \bullet C_c = 45\mu\text{F} \\ & \bullet f_s = 50\text{kHz} \end{aligned}$$

그림 8은 실험파형이다. 그림 8(a)는 스타트업 파형으로 C_c 초기충전 후에 듀티를 선형적으로 증가시켜 출력전압이 서서히 증가하는 것을 볼 수 있다. 이 때 듀티가 선형적으로 증가하여 소자의 스트레스가 없는 것을 볼 수 있다. 그림 8(b)는 정상상태 입력전류, 전압, 배터리전압 파형으로 높은 역률을 가지는 것을 확인할 수 있다. 그림 8(c)는 변압기 전압파형으로 저주파 성분이 완전히 제거되어 스위칭 성분만 존재하는

것을 볼 수 있다. 이로 인해 변압기 코어의 최적화되어 부피 및 손실이 저감된다. 그림 8(d)는 인터리빙 효과를 갖는 인덕터 전류 파형이며 그림 8(e), (f)는 스위치 파형으로 모두 ZVS 턴 온을 성취한다. 그림 8(g)는 출력 다이오드 파형으로 모두 ZCS 턴 오프를 성취한다. 그림 9는 측정 역률 및 효율로 정격에서 역률 0.99를 달성하였으며 최고효율 94.5%를 달성하였다.



(a) Start-up

(b) v_g , i_g and V_{bat} 

(c) Waveform and FFT of transformer

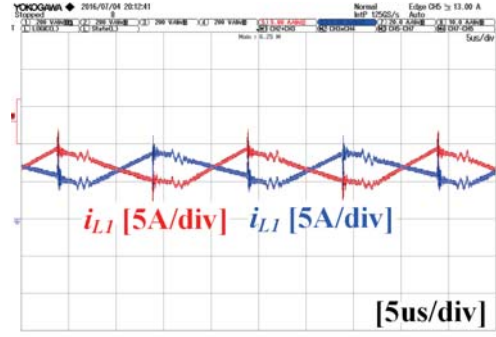
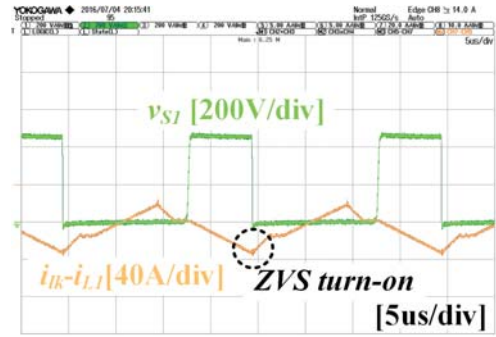
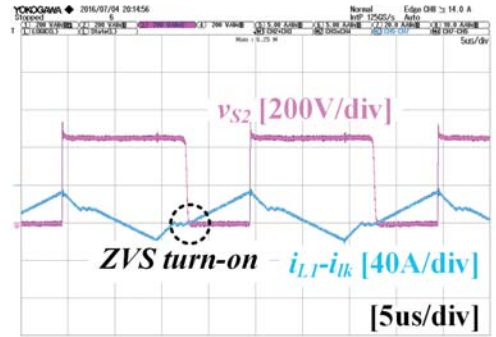
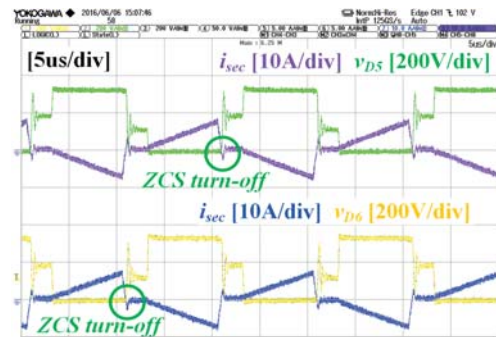
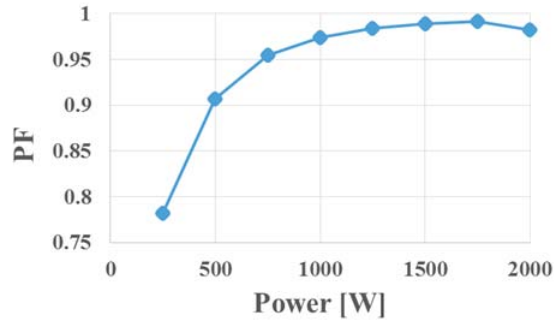
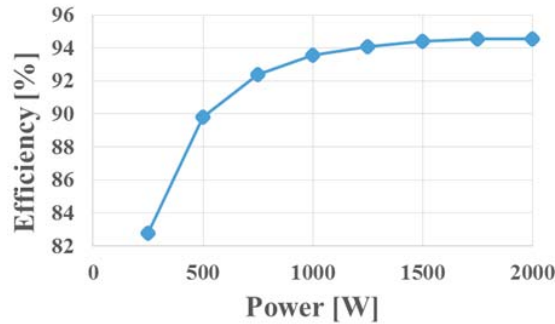
(d) i_{L1} , i_{L2} (e) i_{S1} , v_{S1} (f) i_{S2} , v_{S2} (g) i_{D5} , i_{D6} , v_{D5} and v_{D6}

Fig. 8. Experimental waveform of the proposed EV charger.



(a) PF



(b) Efficiency

Fig. 9. Measured power factor and efficiency.

5. 결 론

본 논문에서는 전해커패시터가 없는 적은 소자수를 갖는 단일단 인터리브드 소프트스위칭 전기자동차용 충전기를 제안하였다. 제안하는 인터리빙 회로와 스위칭 기법으로 변압기의 저주파성분을 제거하였고 스위치의 ZVS 턴 온과 다이오드의 ZCS 턴 오프를 성취하였다. 2kW급 시작품을 통해 제안하는 단일단 충전기의 타당성을 검증하였고 정격사양에서 각각 역률은 0.99를 달성하였으며 최고효율 94.5%를 달성하였다.

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2014R1A2A2A01003724)

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] B. Singh, B. N. Singh, A. Chandra, K. Al-Haddad, A. Pandey, and D. P. Kothari, "A review of single-phase improved power quality AC-DC converters," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 50, No. 5, pp. 962-981, Oct. 2003.
- [5] 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.
- [6] H. M. Xu, X. B. Ruan, and Y. G. Yan, "A novel forward single-stage single-switch power factor correction AC/DC converter," *Power Electronics Specialists Conference, 2001. PESC. 2001 IEEE 32nd Annual*, Vancouver, BC, Vol. 2, pp. 754-759, 2001.
- [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] Y. Choi, M. H. Keum, S. K. Han, and J. Il Kang, "High efficiency and high power factor single-stage balanced forward-flyback converter," *Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE*, Vienna, pp. 822-827, 2013.
- [9] 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.
- [10] 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, Apr. 2015.
- [11] S. Bala, T. Tengner, P. Rosenfeld, and F. Delince, "The effect of low frequency current ripple on the performance of a lithium iron phosphate(LFP) battery energy storage system," in *Proc. IEEE Energy Convers. Congr. and Expo(ECCCE)*, pp. 3485-3492, 2012.
- [12] M. J. Kim, B. W. Kim, B. K. Jung, and S. W. Choi, "A single-stage interleaved soft-switching on-board charger with low frequency-less transformer," *Power Electronics Annual Conference*, pp. 275-276, July 2016.



김민재(金民才)

1988년 10월 25일생. 2011년 서울과학기술대 제어계측공학과 졸업. 2013년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2016년 동 대학 에너지환경대학원 신에너지공학과 졸업(공학박사). 2016년~현재 (주)뉴파워프라즈

마 기술연구소 재직 중.



김병우(金丙宇)

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



정범교(鄭汜敎)

1990년 4월 3일생. 2015년 창원대 전기공학과 졸업. 2015년~현재 서울과학기술대 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.

합 연구소 수석연구원. 1997년~현재 서울과학기술대 전기정보공학과 교수. 당 학회 부회장.