

넓은 전압 범위를 갖는 양방향 충전기 개발

나재호¹, 박준성², 전유종², 신외경², 이충열³, 김래영[†]

Development of Bi-directional Charger With a Wide Voltage Range

Jaeho Na¹, Jun-Sung Park², Yujong Jeon², Wae-Gyeong Shin², Chungyoul Lee³, and Rae-Young Kim[†]

Abstract

This paper proposes a DC-DC converter that satisfies a wide output voltage of 150 V - 1000 V for the battery voltage of various electric vehicles and can be controlled in both directions for the demand resource of electric vehicles. The proposed converter is a two-stage structure in which an insulated converter and a non-isolated converter are combined and operates as constant current or constant power depending on the voltage of the connected battery. Experimental results from a 20 kW prototype are provided to validate the proposed charger, and a maximum efficiency of 97% is obtained.

Key words: EV (Electric Vehicle), Fast-charger, V2G (Vehicle to Grid), Two-stage DC-DC converter

1. 서 론

최근 환경오염 및 CO₂ 규제가 중요시되면서 각 나라의 정부는 보조금 지원 등 장려 정책을 시행하여 전기자동차 보급이 급격히 증가하고 있다. 전기자동차의 급증에 따라 EV(Electronic Vehicle) 충전의 불편함을 해소하기 위해 충전 인프라 구축 또한 세계적으로 이슈이다. 기존의 EV 충전기는 그림 1과 같이 전기자동차가 충전기에 연결되는 즉시 충전이 시작되고, 완충 시 충전이 종료되는 단순 전력공급(V0G) 방식이 주로 설치되어 왔다^{[1],[2]}. 그러나 EV 10만대는 약 7000MW급 ESS와 같은 수요 자원이므로 EV의 배터리 제어를 통해 에너지 자원으로 활용이 가능하기 때문에 양방향 충·방전 제어(V2G)에 대한 연구가 급증하고 있다^{[3],[4]}. 또한 전기적 안전 때문에 절연이 요구되고 급속 충전을 위해 전기자동차의 배터리 전압 사양이 높아지고 있는 추세이기 때문에 다양한 배터리 전압 사양을 만족시키는 양방향 EV 충전기 개발이 필요하다.

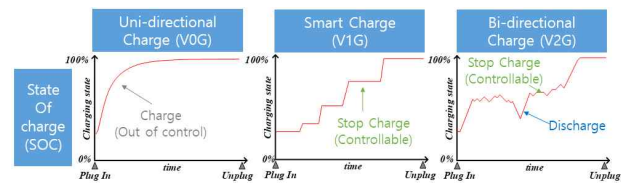


Fig. 1. Charging method of electric vehicle.

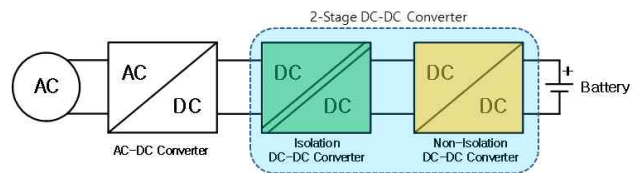


Fig. 2. Block diagram of the proposed charger.

이러한 EV 충전기의 직류변환장치는 일반적으로 절연형인 공진형 컨버터와 위상천이(Phase shift full bridge, PSFC) 컨버터를 많이 사용한다^{[5],[6]}. 두 컨버터 모두 소프트 스위칭이 가능하여 스위칭 손실을 줄일 수 있지만 PSFC 컨버터는 가장 높은 듀티비를 갖는 최대 전압에서 효율이 높고 출력전압이 낮아질수록 듀티비가 작아져서 순환전류로 인해 효율이 감소하는 특징이 있다. 따라서 단방향이면서 출력전압 범위가 점점 더 넓어지면서 종래의 PSFC를 이용한 방식은 한계에 도달하였다.

공진형 컨버터의 경우 반도체 스위치가 On이 되었을 때 피크 전류가 크기 때문에 높은 전압과 전류를 만족하는 부품을 선정하기 어렵고 넓은 전압을 제어하는 것

Paper number: TKPE-2022-27-1-10

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

[†] Corresponding author: rykim@hanyang.ac.kr, Dept. of Electrical Bio-Engineering, Hanyang University, Korea
Tel: +82-2-2220-2897 Fax: +82-2-2220-0570

¹ Dept. of Electrical Engineering, HYPEC-EPECS Lab., Hanyang University, Korea

² Electric Powertrain R&D Center, KATECH, Korea

³ SIGNET EV Inc., Korea

Manuscript received Nov. 10, 2021; revised Nov. 20, 2021; accepted Dec. 1, 2021

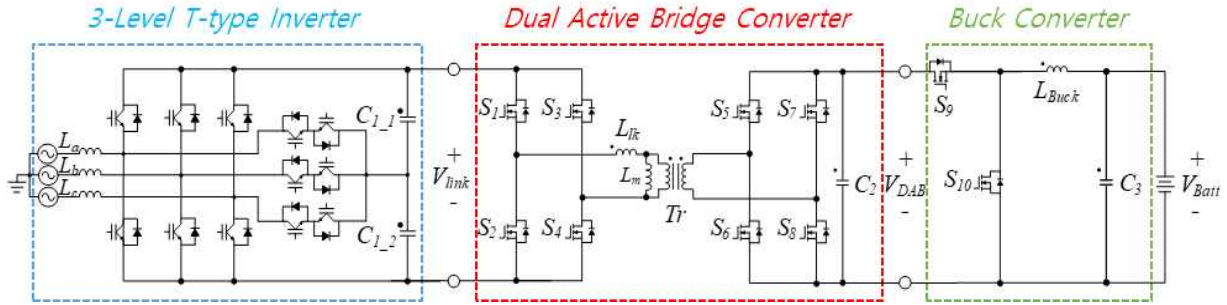


Fig. 3. Circuit of proposed bi-directional charger.

TABLE I
CHARGER SPECIFICATION

Parameter	Specification	Note
Rated power	20 [kW]	-
Input voltage	380 [Vrms]	AC
Output voltage	150 - 1000 [V]	DC
Output current	0 - 20 [A]	DC
Power factor	>0.95	rate power
THD	<5%	rate power
Maximum efficiency	>96%	rate power
Charging method	CC-CP	-

컨버터는 효율을 높이기 위해 3레벨 구조의 토폴로지를 사용하였으며 DC-DC 컨버터는 양방향이 가능하고 넓은 출력범위에서 고효율을 유지하기 위해 DAB(Dual active bridge) 컨버터와 Buck 컨버터를 직렬 연결한 결합형 컨버터를 사용하였고 특정 전압 범위에서 효율을 극대화하기 위한 제어방식을 제안한다.

2.1 AC-DC 컨버터

3상 AC-DC 컨버터는 3상 AC 계통 전압을 DC 전압으로 변환하면서 계통 전류의 고조파 성분 제거 및 역률 보상을 수행한다. AC-DC 컨버터는 3레벨 구조의 대표적인 T-type 토폴로지를 사용하였다. 3레벨 구조는 2레벨 구조에 비해 소자 수가 많지만 전압 정격이 낮아 비교적 손실이 적고, 계통 입력단 필터부의 수동소자를 작게 사용할 수 있는 장점이 있다^{[7],[8]}. 제안하는 양방향 충전기의 AC-DC 컨버터는 배터리 전압에 따라 DC Link 전압(V_{link})을 가변하여 제어하면서, 계통 전류 THD 성능을 위해 고조파 보상 제어가 포함된 전류 제어기가 입력 역률 제어를 한다.

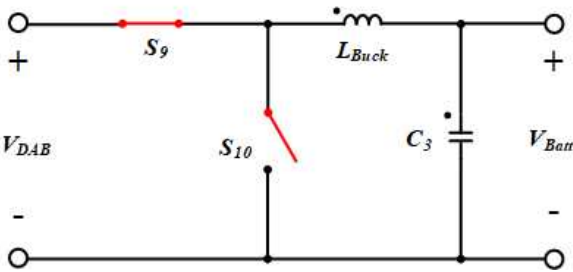


Fig. 4. Bypass mode of buck converter.

이 쉽지 않다. 이러한 단점을 극복하기 위해 그림 2와 같이 최근에는 절연형 직류변환장치 및 비절연형 직류변환장치로 구성된 2단 접속 방식의 직류변환 장치에 대한 연구가 활발하게 이루어졌다. 기존에 2단 접속 방식은 절연형 컨버터는 전압 제어를 하지 않고 최적의 조건에서 고정으로 동작하고 비절연 컨버터로 출력을 제어하는 방식으로 넓은 출력전압 범위에서 일정한 효율을 달성하였지만 2개의 컨버터가 항상 동시에 동작되어 최고 효율이 낮은 문제가 있다.

2. 제안하는 양방향 충전기

제안하는 양방향 충전기는 표 1과 같은 설계 사양을 가지며, 그림 3은 전체적인 토폴로지를 보인다. AC-DC

2.2 DC-DC 컨버터

2-stage 구조의 DC-DC 컨버터에서 절연형 컨버터는 소프트 스위칭이 가능한 공진형 컨버터와 위상천이 스위칭을 하는 준공진형 컨버터가 적용될 수 있고 비절연형 컨버터는 승압형 컨버터인 Boost 컨버터와 강압형 컨버터인 Buck 컨버터 등이 적용될 수 있다. 본 연구에서 설계한 충전기의 출력은 최대 1000V까지 높은 전압에서 동작하기 때문에 공진형 컨버터보다 비교적 피크 전류가 작아 부품선정에 유리한 DAB 컨버터를 선정하였다^[9]. 비절연형 컨버터는 그림 4와 같이 Buck 컨버터를 선정하였고 높은 출력전압 범위에서 메인 스위치(S_9)를 계속 On으로 동작하고 상보 동작하는 서브 스위치(S_{10})는 Off하여 바이패스 회로로 동작하면 손실을 최소화할 수 있다. 반대로 낮은 전압 범위에서 효율을 높이기 원한다면 Boost 컨버터를 선정하여 낮은 전압 범위에서 Boost 컨버터가 바이패스 회로로 동작하고 높은 전압 범위에서는 승압하도록 설계할 수 있다.

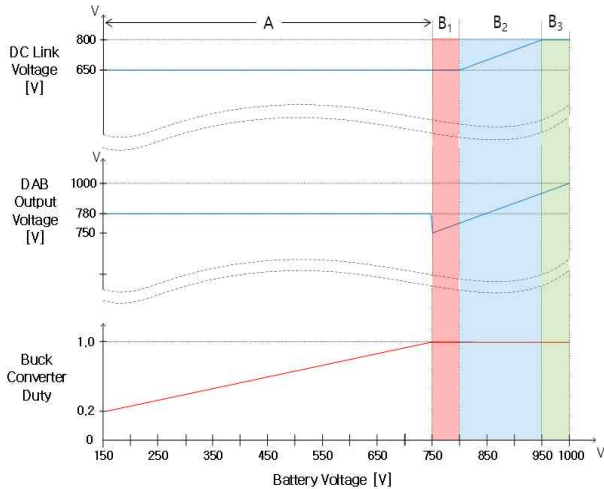


Fig. 5. Operation principle of the proposed charger.

2.3 제안하는 충전회로의 동작원리

최근 출시되는 전기자동차의 배터리 전압 사양이 높아지고 있는 추세이기 때문에 본 논문에서는 높은 전압 영역에서 효율을 극대화하는 제어 방식을 선정하였다.

그림 5는 충전기의 출력전압에 따른 AC-DC 컨버터와 DC-DC 컨버터의 동작 원리를 보인다. 출력전압이 750V보다 낮은 전압 A 영역에서는 AC-DC 컨버터가 DC Link 전압을 650V로 고정하여 제어하고 DAB 컨버터는 변압기의 1차측과 2차측의 턴비와 동일한 비율로 DC Link 전압을 승압하여 C_2 에 걸리는 전압을 제어한다. 이때 변압기의 턴비는 1:1.2이고 DAB의 출력전압은 780V이다. Buck 컨버터는 Duty를 가변하여 DAB의 출력전압을 전기자동차가 요청하는 배터리 전압까지 강압하여 동작한다. B_1 - B_3 의 영역에서는 Buck 컨버터의 Duty가 1이 되어 바이패스 회로로 동작하여 효율이 높은 영역이다. B_1 영역에서 DC Link 전압은 A 영역과 동일하게 650V를 일정하게 제어하고 DAB 컨버터의 전압을 제어하여 최종 출력 전압을 배터리 전압만큼 가변한다. B_2 영역에서 DAB 컨버터는 A 영역과 동일하게 변압기의 턴비만큼 C_2 의 양단전압을 제어하고 AC-DC 컨버터가 DC Link 전압을 최대 800V까지 제어하여 최종 출력전압에 관여한다. B_3 영역은 DC Link 전압이 800V로 고정이고 DAB 컨버터의 출력을 가변하여 최대 1000V까지 제어한다.

DAB 컨버터는 특성상 입력전압과 출력전압의 비율이 변압기의 턴비와 동일한 비율일 때 피크 전류가 작고 부하에 따른 소프트 스위칭 영역이 넓기 때문에 효율이 가장 좋다. 따라서 A 영역에서 2-stage DC-DC 컨버터의 두 컨버터가 모두 동작하지만 DAB의 효율이 높은 영역에서 동작하기 때문에 전체 효율은 비교적 많이 감소하지 않는다. 또한 B_1 과 B_3 영역에서는 Buck 컨버터가 바이패스 회로로 동작하는 전압범위를 넓히기 위해 DAB 컨버터의 출력전압을 가변하였다. 이때 B_1 과 B_3 의



Fig. 6. Prototype of the proposed charger and rated test environment.

전압범위는 DAB 컨버터가 제어 가능한 위상 내에서 피크전류와 소프트스위칭 영역을 고려하여 선정한다.

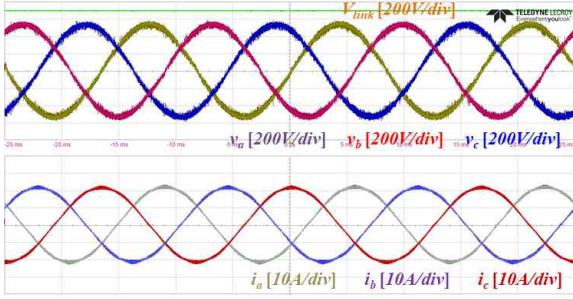
3. 실험

그림 6은 제안하는 충전기의 타당성을 검증하기 위한 20kW 시작품과 시험 환경을 보인다. DC-DC 컨버터의 각 스위치는 Infineon社의 SiC MOSFET 모듈인 'ff11mr12w1m1_b11' 제품을 사용하였고 제어기의 DSP는 TI社의 Dual-core TMS320F28337D를 사용하여 하나의 IC로 AC-DC 컨버터와 2-stage DC-DC 컨버터를 모두 제어하였다. 3상 380V AC 전원을 입력받고 출력전압을 150V에서 1000V까지 제어하였으며 최대 20A까지 측정하였다.

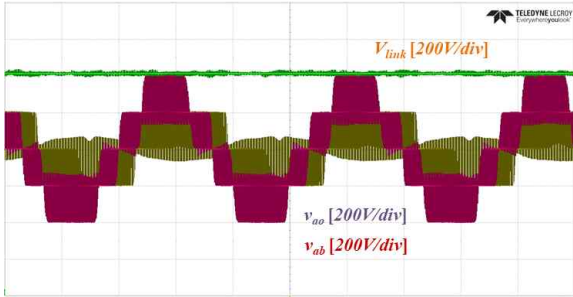
그림 7(a)는 AC-DC 컨버터의 계통측 3상 전압과 전류를 보여주고 정격부하에서 THD는 약 3%로 측정되었다. 그림 7(b)는 DC 링크 전압과 3레벨 전압을 보여준다. 그림 7(c)는 부하별 3상 전류를 보여주고 그림 7(d)는 DC 링크 전압을 배터리 전압에 따라 700V에서 800V까지 가변하는 상황을 보여준다.

그림 8은 YOKOGAWA사의 WT3000을 이용하여 측정한 효율이고, 그림 8(a)는 전류에 따른 전압별 효율 그래프이다. 800V에서 최대 약 97%의 효율을 달성하였으며 정격부하에서 약 95.5%의 효율을 달성하였다. 그림 8(b)는 기존 충전기에서 사용되는 20kW급 750V 단방향 파워 모듈의 효율과 제안하는 충전기의 효율을 비교한 그래프이다.

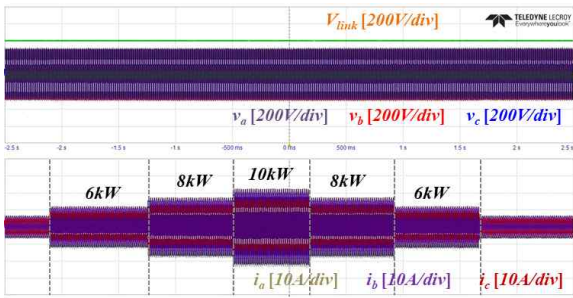
그림 9는 제안하는 양방향 충전기의 실차 충전시험 환경을 보여준다. 실차 충전에는 800V급 아이오닉5와 EV6 그리고 400V급 차량인 코나EV, 소울EV, 볼트 EV 등이 사용되었다. 그림 10은 실차 충전 시 측정된 전압 및 전류 파형을 보인다. 그림 10(a)는 아이오닉5의 충전



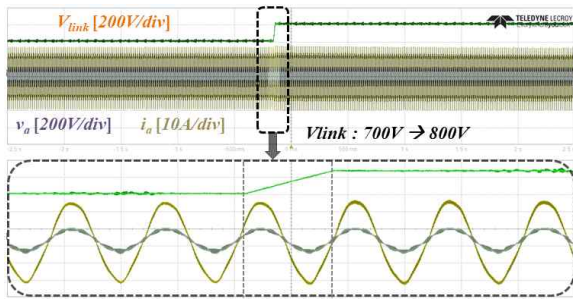
(a) Grid voltage and current at 20 kW



(b) 3-Level operation



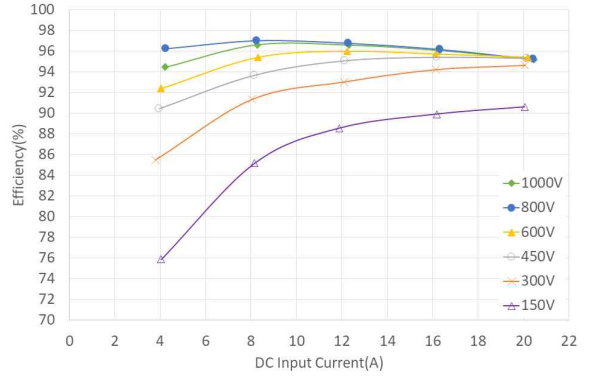
(c) Load variation control



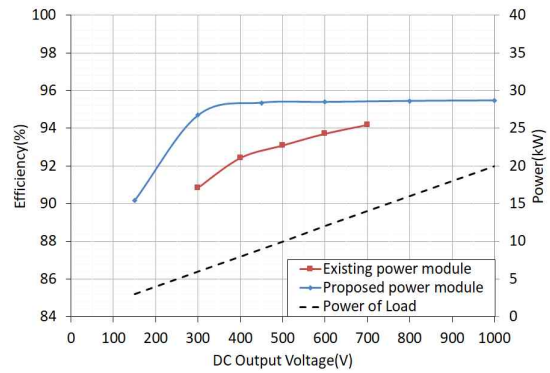
(d) DC link voltage variation control

Fig. 7. Experimental waveform of AC-DC converter.

및 방전 파형으로서 먼저 절연을 측정하기 위해 약 700V로 Insulation test를 진행하고 문제가 없으면 Pre-charge 단계에서 전기자동차에서 받은 배터리 전압 값과 비슷한 레벨로 충전기의 출력전압을 제한한다. 충전기의 전압이 배터리 전압값의 오차 범위 내로 제어가 되면 전기자동차 내부 릴레이가 On이 되어 충전기와 도통이 되고 전기자동차에서 요청하는 전류 지령 값으로



(a) Efficiency according to the load of the proposed charger



(b) Efficiency of the proposed power module and the existing power module

Fig. 8. Measured efficiency.

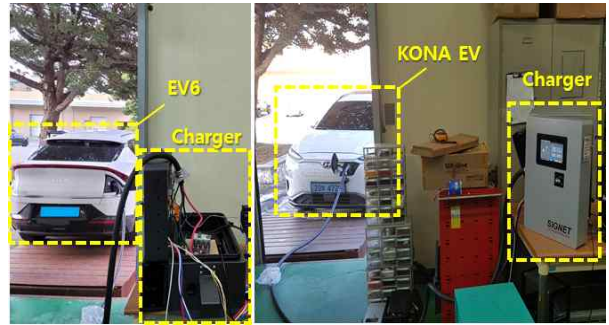


Fig. 9. Experimental environment using electric vehicles.

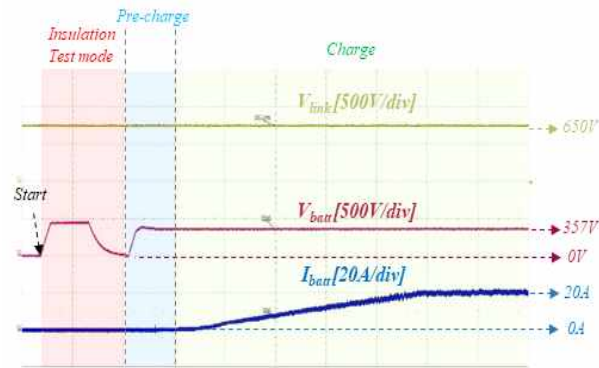
전류제어를 하게 된다. 충전 중 사용자 또는 전력거래소의 요청에 의해 방전 요청이 발생하면 전기차에서 출력할 수 있는 전류의 값으로 Grid 또는 기타 부하 장치로 전력을 공급하게 된다. 그림 10(b)는 400V급 코나 EV의 충전 전압과 전류의 파형을 보인다.

4. 결론

본 논문에서는 넓은 충전전압 범위를 갖는 20kW급 V2G용 양방향 충전기를 개발하였다. 높은 효율을 얻기



(a) Bi-directional electric vehicle with high voltage



(b) Uni-directional electric vehicle with low voltage

Fig. 10. Experimental waveforms of charging and discharging using electric vehicles.

위하여 AC-DC 컨버터는 3레벨 토폴로지로서 적용하였고 DC-DC 컨버터는 DAB 컨버터와 Buck 컨버터를 직렬로 결합한 2-stage 구조로 적용하였으며 특정 전압 구간에서 Buck 컨버터를 바이패스 회로로 동작하여 최대 효율 약 97%, 정격효율 약 95.5%를 달성하였다. 또한 실증 시험을 위해 다양한 전기자동차를 이용하여 넓은 전압 범위에서 충전 및 방전의 성능을 검증하였다.

본 논문은 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20182010600390)

References

- [1] 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.
- [2] 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.

- [3] G. B. Sahinler and G. Poyrazoglu, "V2G applicable electric vehicle chargers, power converters & their controllers: a review," in *2020 2nd Global Power, Energy and Communication Conf.*, pp. 59 - 64, Oct. 2020.
- [4] D. Aggeler, F. Canales, H. Z. D. L. Parra, A. Coccia, N. Butcher, and O. Apeldoorn, "Ultra-fast dc-charge infrastructures for EV-mobility and future smart grids," in *Proc. IEEE Power Energy Soc. Innovative Smart Grid Technol. Conf.*, Europe, pp. 1 - 8, Oct. 2010.
- [5] T. Mishima, K. Akamatsu, and M. Nakaoka, "A high frequency-link secondary-side phase-shifted full-range soft-switching PWM DC-DC converter with ZCS active rectifier for EV battery chargers," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 28, No. 12, pp. 5758 - 5773, Dec. 2013.
- [6] J. H. Kim, W. S. Lee, S. W. Choi, J. Y. Lee, and I. O. Lee, "A new DC-DC converter topology for high-efficiency electric vehicle rapid chargers." *The Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 23, No. 3, pp. 182 - 189, 2018.
- [7] M. Schweizer and J. W. Kolar, "Design and implementation of a highly efficient three-level T-type converter for low-voltage applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 28, No. 2, pp. 899 - 907, Feb. 2013.
- [8] P. Alemi, Y. C. Jeung, and D. C. Lee, "DC-link capacitance minimization in T-type three-level AC/DC/AC PWM converters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 62, No. 3, pp. 1382 - 1391, Mar. 2015.
- [9] 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.



나재호(羅在皓)

1989년 3월 9일생. 2014년 공주대 제어계측 공학과 졸업. 2017년 동 대학원 전기전자제어과 졸업(석사). 2020년~현재 한양대 전기공학과 박사과정. 2018년~현재 한국자동차연구원 전기구동연구센터 연구원.



박준성(朴峻成)

1982년 4월 26일생. 2009년 서울과학기술대 제어계측공학과 졸업. 2011년 동 대학 에너지환경대학원 신에너지공학과 졸업(석사). 2016년 동 대학원 졸업(공학박사). 2015~현재 한국자동차연구원 전기구동연구센터 책임 연구원.



전유종(全裕宗)

1990년 6월 5일생. 2016년 공주대 제어계측 공학과 졸업. 2016년~현재 한국자동차연구원 전기구동연구센터 연구원.



이충열(李忠列)

1971년 1월 23일생. 1997년 한국외국어대 환경학과 졸업. 1999년 건국대 환경공학 졸업(석사). 2007년도 전남대 환경에너지 졸업(공학). 2017년~현재 (주)시그넷이브리 충전 인프라사업본부 이사.



신외경(申外敬)

1970년 8월 28일생. 1994년 경상대 고분자 공학과 졸업. 1996년 동 대학 고분자공학과 졸업(석사). 2010년 연세대 기계공학과 졸업(공학). 1996년~현재 한국자동차연구원 전기구동연구센터 센터장.



김래영(金來瑛)

1974년 6월 6일생. 1997년 한양대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년 미국 Virginia Tech. 전기공학과 졸업(공학). 1999년~2004년 효성 중공업 연구소 선임연구원. 2009년~2010년 미국 National Semiconductor Senior Researcher. 2016년~2017년 미국 Virginia Tech CPES 방문교수. 2010년~현재 한양대 전기생체공학부 교수. 당 학회 총무이사.