

능동전력디커플링을 이용한 승압 DC충전과 DC V2V 기능을 갖는 3상 22kW/단상19.2kW 1단 OBC 개발

송희경¹, 응웬 딩 바오 흥¹, 김한수¹, 밀리언 제라도 게다¹, 최세완[†], 시단트 판데이²
 서울과학기술대학교¹, (주)솔루션엑스²

3φ 22kW/1φ 19.2kW Single-stage OBC With Boost DC Charging and DC V2V functions using APD

Huigyeong Song¹, Nguyen Dinh Bao Hung¹, Hansu Kim¹, Million Gerado Geda¹
 and Sewan Choi[†], Siddhant Bikram Pandey²
 Seoul National University Science and Technology¹, SolutionX Co., Ltd.²

ABSTRACT

전기차 주행 거리 증가에 대한 수요가 높아지면서 배터리 용량도 증가하고 있다. 배터리 용량이 증가할수록 충전 시간이 길어지기 때문에 더 높은 전력의 OBC에 대한 요구가 높아지고 있다. 22kW OBC는 이러한 대용량 배터리를 보다 효율적으로 충전할 수 있어 적합하다.^[1] 본 논문에서는 3상 22kW/단상 19.2kW 1단 OBC를 설계하고 개발하였다. 전해커패시터를 제거하고 입력 인덕터와 변압기를 통합하여 부피와 가격을 절감하였다. 1차 시작품을 제작하여 실험한 결과 3상 피크 효율 97.7%, 단상 피크 효율 96.6%를 달성하였다.

1. 서론

현재 400V급 급속충전기는 보편화되어 있으며 최근에는 800V용 초급속 충전기가 설치되고 있어 400V 급속 충전기와 800V 급속 충전기가 혼재해 있는 상황이다. 대개 800V 급속충전기는 400V 배터리를 충전할 수 있으나 400V 급속 충전기로 800V 배터리를 충전하는 것은 어려워 별도의 수단이 필요하다. 이에 차량 내의 추가적인 부스트 컨버터를 장착하거나^[4] 모터용 인버터를 부스트 컨버터로 이용하여^[5] 400V 급속 충전기로 800V 배터리를 충전하는 등의 방법이 제시되었다. 본 논문에서 제시한 회로는 1단 OBC의 단상 교류 입력 시 사용하는 능동전력 디커플링 회로(Active Power Decoupling circuit 이하 APD 회로)를 승압 컨버터로 사용할 수 있다.^[3] 이를 통해 추가되는 부품 없이 400V 급속 충전기로 800V 배터리를 충전하는 승압 DC충전이 가능하다. 또한 2차측의 APD회로를 통해 DC V2V(Vehicle to Vehicle) 기능을 구현할 수 있다. V2V 기능은 충전 인프라가 부족한 환경에서 전기차 간 배터리 긴급 충전을 가능하게 하는 등, 보다 유연한 충전 옵션을 제공할 수 있다.^[2]

본 논문에서는 인터리브드 토탐플 기반의 22kW급 1단 OBC를 제안한다. 제안하는 1단 OBC는 멀티포트 구조를 가지며 승압 DC충전과 DC V2V 기능 등 다양한 동작모드를 지원한다.^[3] 또한 넓은 전압 범위에서 소프트 스위칭이 가능하여 높은 효율을 성취할 수 있다. 22kW급 시작품의 실험을 통해 3상 22kW/단상 19.2kW 동작과 승압 DC 충전 동작을 검증하였다.

2. 제안하는 22kW급 1단 OBC

그림 1은 본 논문에서 제안하는 1단 OBC 회로도모를 나타낸다. 각 상은 모듈러 구조로 총 3개의 1단 AC-DC부와 APD 회로로 이루어져 있다. 제안하는 OBC는 DC 측에 멀티포트 구조를 갖는다. 3개 모듈의 출력은 병렬로 연결되어 있으며 이 포트는 차량 내의

고전압 배터리에 연결된다. APD 회로 내 디커플링 커패시터의 + 단자들을 병렬로 연결한 DC 포트는 차량 외부의 배터리 혹은 400V 급속 충전기에 연결될 수 있다. 멀티포트 구조를 통해 제안하는 OBC는 다양한 충전 모드를 지원할 수 있다.^[3]

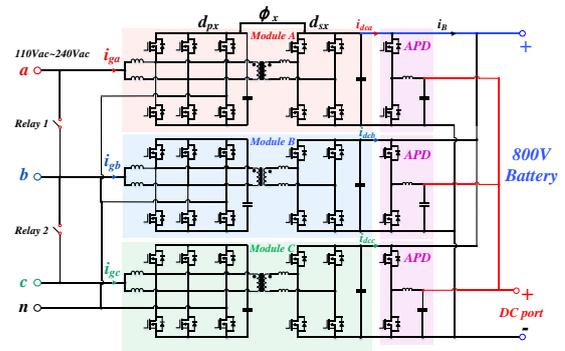
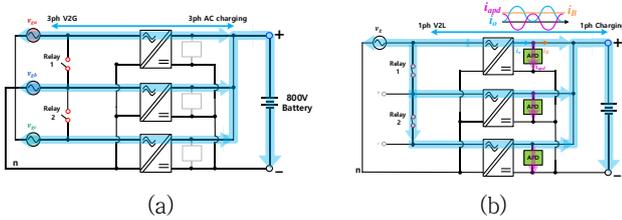


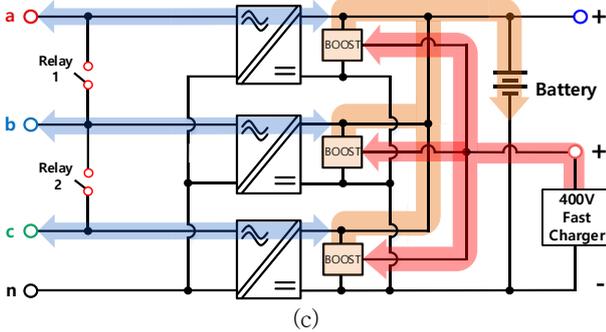
그림 1. 제안하는 V2V/승압 DC충전 기능을 갖는 단상/3상 겸용 1단 OBC

2.1 동작 모드

그림 2는 제안하는 토폴로지에서 가능한 동작 모드들을 정리한 것이다. 그림 2(a)는 3상 교류 전원을 입력으로 받을 시의 충전 모드이다. 3상 충전시에는 각 상은 모듈 당 최대 7.4kW, 총 22kW 동작이 가능하다. 3상 교류 전원을 입력으로 받을 때는 출력 DC 전류의 120Hz 성분이 상쇄되어 리플이 없는 배터리 전류를 얻을 수 있다. 이때 릴레이 1,2는 OFF 상태이고 2차측 APD 회로는 동작하지 않는다. 그림 2(b)는 단상 교류 전원을 입력으로 받을 때의 충전 모드이다. 이때는 릴레이 1,2가 닫히고 2차측 APD회로가 배터리 측의 저주파 전류 리플을 제거하는 데 사용된다. 기존에는 1대의 AC-DC 컨버터 모듈을 능동전력 디커플링 회로로 사용하였으나^[7] 본 논문에서는 백 컨버터 회로를 추가함으로써 3개의 모듈을 모두 파워 전달에 사용한다. 이에 단상 교류 전원 입력 시에는 계통 전류 80A, 최대 19.2kW 동작이 가능하다. 그림 2(c)는 AC 충전과 DC 충전을 동시에 하는 모드이다. 3상 교류 전원을 받아 충전 동작을 할 시에 2차 측의 APD 회로를 DC-DC 컨버터로 사용할 수 있다. 400V 급속 충전기로 800V 배터리를 충전하는 승압 DC 충전이 가능하여 총 충전량을 증대시킬 수 있다. 혹은 다른 차량과 DC V2V 동작할 수 있어 하나의 완속 충전기로 두대의 차량을 충전시킬 수 있다. 그림 2(d)는 2차측 APD 회로만 단독으로 동작하는 모드이다. 단독 동작 시 다른 EV와 연결하여 DC V2V 동작을 하거나 400V 급속 충전기로부터 승압 DC충전 동작을 수행할 수 있다.



(a) (b)



(c) (d)

그림 2. 동작 모드

- (a) 3ph AC charging / V2G (b) 1ph AC charging/V2L with PD
- (c) 3ph AC charging + DC charging (d) DC V2V

2.2 제어 블록도

그림 3은 제안하는 시스템의 제어 블록도이다. AC 충전 시 배터리 전압을 레퍼런스로 받아서 배터리 SOC에 맞게 CC-CV 충전할 수 있다. 본 논문에서는 [7]에서 제시한 스위칭 모듈레이션 기법을 사용하여 넓은 전압 범위에서 소프트 스위칭이 가능하고 높은 효율을 성취하였다.

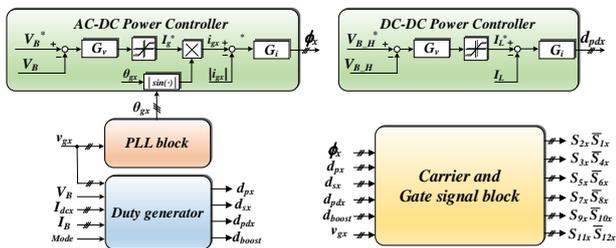


그림 3. 제어 블록도

3. 제작 및 실험 결과

제안하는 1단 OBC의 동작과 성능 검증을 위해 그림 4와 같이 22kW 시작품을 제작하였다. 그림 5(a)는 3상 충전 동작시 배터리 전압 670V, 22kW일때의 파형이다. 그리드 전류 THD 2.6%를, 각 상의 출력 전류 리플은 상쇄되어 배터리 전류 리플은 3.2A로 측정되었다. 그림 5(b)는 단상 충전 동작시 배터리 전압 600V, 19.2kW일때의 파형으로 입력 전류 THD 5.6%를 기록하였다.

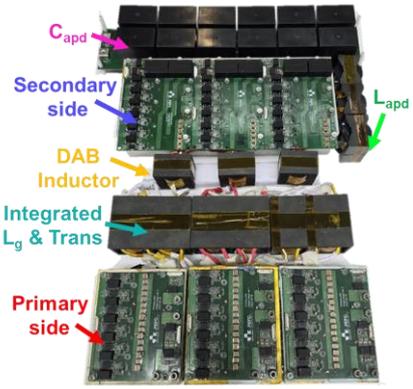
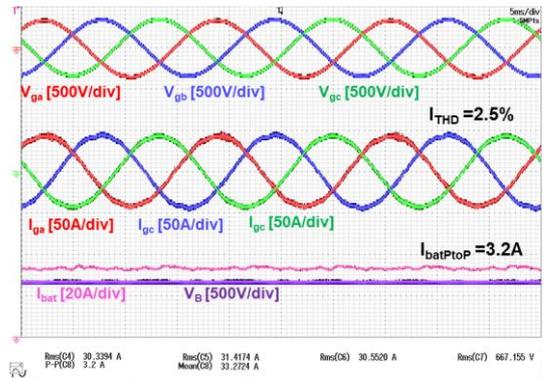
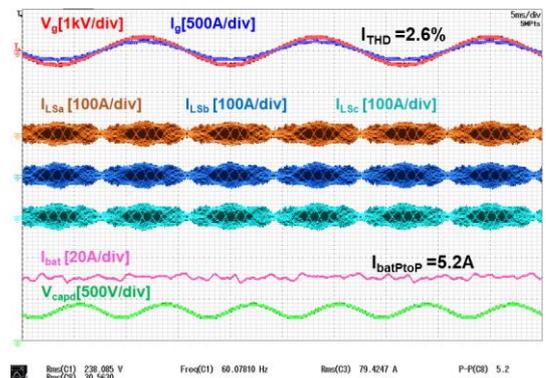


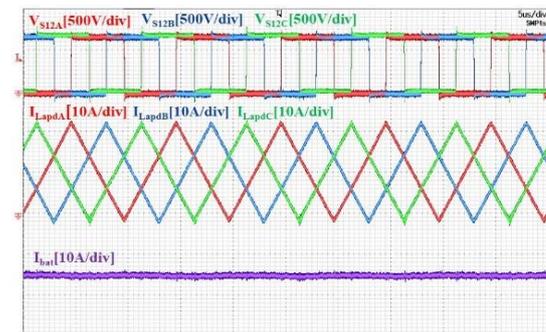
그림 4. 1단 방식 OBC 22kW급 시작품



(a)



(b)



(c)

- 그림 5. 실험 파형
- (a) 3상 22kW @670Vdc (b) 단상 19.2kW @600V
- (c) 승압 DC충전 파형 10kW @800V

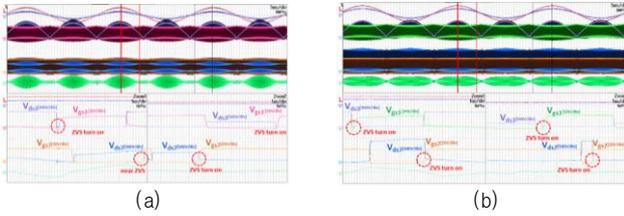
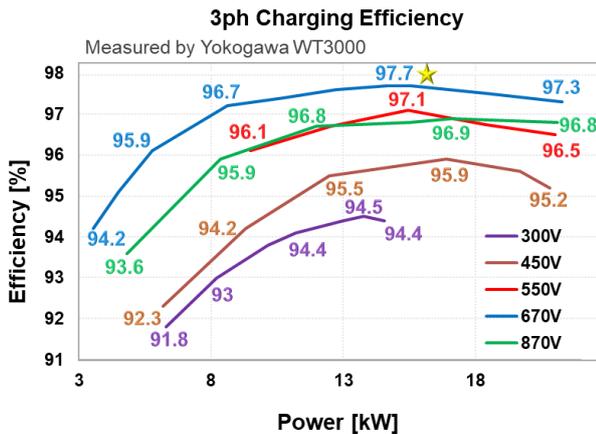
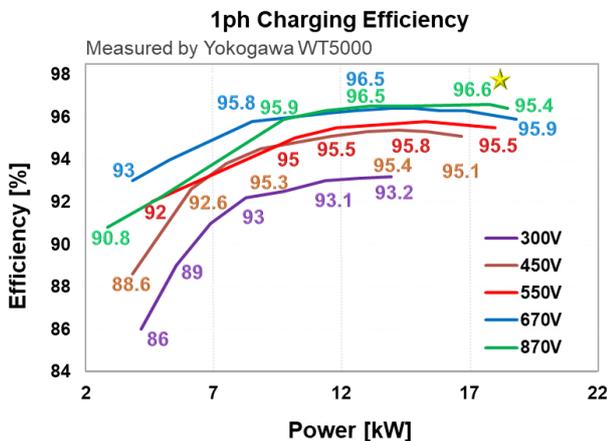


그림 6. AC 충전 ZVS turn on 파형
(a)@300Vdc, (b) @870Vdc

단상 교류 전원을 입력으로 받아 2차측의 APD 회로를 동작 시켜 배터리 전류의 저주파 리플을 제거하였고 배터리 전류 리플 값은 5.2A로 측정되었다. 그림 6(a)와 (b)는 각각 배터리 전압 300V, 870V 정격 파워에서의 AC 충전 동작 파형으로 1,2차측 스위치가 ZVS를 성취하는 것을 확인할 수 있다. 그림 5(c)는 APD 회로 단독 모드의 승압 DC충전 동작으로 입력 400V, 출력 800V, 10kW에서의 파형이다. 그림 7(a)와 (b)는 각각 출력 배터리 전압별 3상 AC 충전, 단상 AC충전시 OBC의 측정 효율로 3상 최고 효율 97.7%, 단상 최고 효율 96.6%를 달성하였다.



(a) 3상 충전 그래프



(b) 단상 충전 그래프

그림 7. 부하별 효율 그래프

4. 결론

본 논문에서는 다기능 22kW급 1단 방식 OBC 시스템을 개발하였다. 단상 교류 전원 입력시 사용되는 APD 회로를 승압 DC충전과 DC V2V 동작에 사용함으로써 추가되는 소자를 줄였다.

제안하는 멀티포트 구조와 APD 회로를 이용하여 최대 50kW 급속 충전이 가능하다. 22kW급 시작품을 제작하여 동작을 검증하였고 3상 최고 효율 97.7%, 입력 전류 THD 2.5%를 단상 최고 효율 96.6%, 입력 전류 THD 2.65%를 달성하였다. 향후 2차 시작품을 제작하여 그림 2(c)에서 제안하는 AC+DC 충전 동시 동작 모드와 V2G, V2L 등의 역방향 동작을 검증하고 향상된 APD 제어기를 적용해 배터리 전류 리플을 줄일 예정이다. 표1은 제작한 시작품 사양을 표2는 실험결과를 정리한 것이다.

표 1 시작품 사양

Table 1 Prototype Specification

Specification		Value	Unit
Input	Power	1Ph: 19.2/ 3Ph: 22	[kW]
	AC Voltage	110~240	[Vac]
	DC Voltage	320~870	[Vdc]
DC Boost	Voltage	320~870	[Vdc]
	Power	50	[kW]

표 2 실험 결과 정리

Table 2 Experiment Overview

Specification		Value	Unit
정격효율	G2V	1Ph: 96.6/ 3Ph: 97.7	[%]
THD	G2V	1Ph: 2.5/ 3Ph: 2.6	[%]

이 논문은 Infineon의 전력반도체 지원을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] A. Khaligh and M. D'Antonio, "Global Trends in High-Power On-Board Chargers for Electric Vehicles," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 68, no. 4, pp. 3306-3324, April 2019
- [2] C. Liu, K. T. Chau, D. Wu and S. Gao, "Opportunities and Challenges of Vehicle-to-Home, Vehicle-to-Vehicle, and Vehicle-to-Grid Technologies," in Proceedings of the IEEE, vol. 101, no. 11, pp. 2409-2427, Nov. 2013
- [3] 서울과학기술대학교 산학협력단. 멀티 포트 충전기, 특히 출원번호 10-2022-0146199, 출원일 2022년 11월 4일, 등록일 2023년 11월 8일.
- [4] Dr. Ing. h.c. F. Porsche Aktiengesellschaft. Method for charging a direct current traction battery at a direct current charging pillar. US 10471837B2, filed Jan 26, 2016, and issued Nov 12, 2019
- [5] 현대자동차주식회사, 기아 주식회사. 차량용 급속충전 시스템 및 방법, 특히 출원번호 10-2018-0043152, 출원일 2018년 4월 13일, 등록일 2023년 6월 8일.
- [6] H. Belkamel, H. Kim and S. Choi, "Interleaved Totem-Pole ZVS Converter Operating in CCM for Single-Stage Bidirectional AC-DC Conversion With High-Frequency Isolation," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 3, pp. 3486-3495, March 2021
- [7] H. Kim, J. Park, S. Kim, R. M. Hakim, H. Belkamel and S. Choi, "A Single-Stage Electrolytic Capacitor-Less EV Charger With Single- and Three-Phase Compatibility," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 37, no. 6, pp. 6780-6791, June 2022.