

전해커패시터 없이 DC충전이 가능한 11kW, 800V 단상/3상 겸용 전기자동차 충전기

김선주, 이재연, 유기범, 최세완†
서울과학기술대학교

Single-phase/Three-phase Compatible E-capless 11kW 800V EV Charger with DC charging

Sunju Kim, Jaeyeon Lee, Gibum Yu, Sewan Choi†
Seoul National University of Science and Technology

ABSTRACT

본 논문에서는 전해 커패시터 없이 DC충전이 가능한 단상/3상 겸용 전기자동차용 탑재형 충전기를 제안한다. 제안하는 충전기는 전해커패시터를 제거하고 필름 커패시터를 사용하여 높은 수명 및 전력밀도를 기대할 수 있으며, 단일단 (Single-stage) 구조로서 스위칭 개수가 적어 가격 절감에 유리하다. 제안하는 Single-stage OBC는 기존 Single-stage OBC의 단상동작에서 발생하는 배터리 측의 120Hz 전류 성분을 추가 스위칭 소자 없이 APD(Active Power Decoupling)회로로 제거하여 단상에서도 배터리에 DC충전이 가능하다. 본 논문에서는 제안하는 OBC와 APD 동작원리를 제시하고 11kW 시제품을 통해 타당성을 검증하였다.

1. 서론

최근 미국 에너지부에서는 친환경 자동차용 전력변환기인 OBC, LDC, HDC의 2020년과 2025년 목표^[1]를 제시하였다. OBC의 2025년 목표는 전력밀도(4.6kW/L), 효율(98%), 가격(35\$/kW)으로, 향후 OBC의 고밀도, 고효율, 저가격 설계가 주된 개발 이슈가 될 것이다. 또한, OBC의 경우 전 세계의 다양한 계통 조건을 만족하기 위한 넓은 전압범위 동작 및 단상/3상 겸용 동작이 요구되는 추세이다.^[2] 기존의 non-modular 2-stage OBC의 경우 PFC단의 커패시터는 3상 입력 시 3상의 고전압을 만족하는 높은 전압정격(>700V)과 단상 입력 시 계통 전압의 2고조파 성분을 저장하기 위한 고용량(5mF)의 커패시터가 요구된다^[3]. 이같이 고전압, 고용량의 조건을 만족하기 위한 전해커패시터는 OBC 전체 부피의 30%이상을 차지하게 된다. 또한, 기존의 modular 2-stage OBC의 경우 많은 소자가 필요하여 전력밀도를 높이는 데 한계가 있으며, 전해커패시터는 OBC의 수명을 단축시켜 신뢰성이 낮다는 문제가 있다.

이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 Single-stage OBC^{[4],[5]}가 제시되었다. Single-stage의 경우 기존 2-stage와 달리 전해 커패시터를 사용하지 않고 소용량 필름 커패시터를 사용하여 부피 저감 및 높은 수명을 가질 수 있다. 하지만 단상 동작 시 충전 전류가 120Hz의 저주파 성분을 가지기 때문에 DC 충전이 불가능한 단점이 있었다.

본 논문에서는 DC 충전이 가능한 Single-stage 단상/3상 겸용 OBC를 제안한다. 제안하는 OBC는 Single-stage modular 컨버터로서, 1차 측은 인터리브드 토템폴 구조로 CCM 동작에

서 모든 스위치가 ZVS(Zero Voltage Switching)된 온 동작을 하여 다이오드의 역회복에 의한 문제가 없다. 또한 넓은 계통 전압 범위에서도 모든 스위치의 소프트 스위칭이 가능해 다양한 계통에서 고효율 달성이 가능하다. 제안하는 OBC는 추가적인 스위칭 소자를 사용하지 않고도 APD를 이용하여 단상 동작 시 DC 충전이 가능하다.

2. 제안하는 단상/3상 겸용 Single-stage OBC

제안하는 11kW 단상/3상 겸용 Single-stage OBC의 회로는 그림 1과 같다. 그림 1은 3상 동작을 나타내며 모듈형 구조로

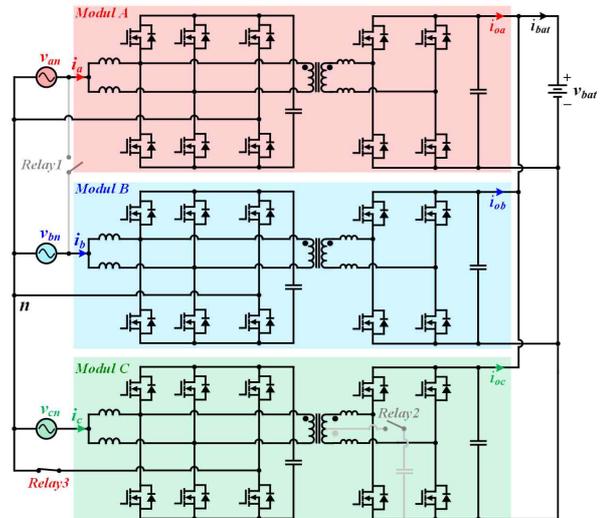


그림 1 제안하는 전해커패시터 없는 단상/3상 겸용 OBC

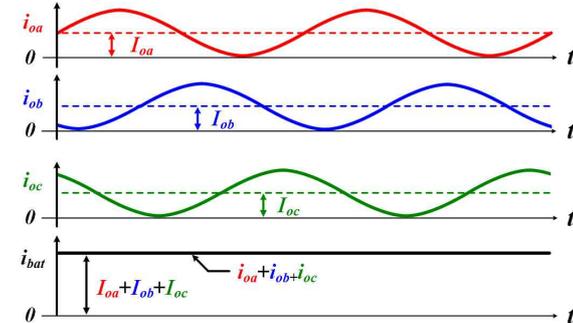


그림 2 3상 DC 충전 동작 원리

출력은 병렬로 구성하여 각 상의 단상 충전기가 입력역률보상과 배터리의 전압 및 전류를 제어한다. 그림 2는 3상 동작 시 배터리 DC 충전의 동작 원리를 나타낸다. 120도의 위상차를 가진 각 상의 전류가 각 모듈의 출력 측에 존재하는 120Hz의 저주파 전류를 상쇄시켜 DC 충전이 가능하다. 그림 3은 APD를 적용한 단상 OBC를 나타내며, A상과 B상 두 개의 모듈은 7.4kW의 파워를 전달하며, C상의 모듈은 Power decoupling 커패시터를 연결함으로써 2 고조파를 제거하여 배터리 전류 DC 충전을 위한 APD 회로이다. 그림 4에서는 단상 DC 충전 동작 원리를 나타낸 것으로 두 출력전류의 합인 $i_{oa}+i_{ob}$ 의 120Hz 성분이 APD 모듈의 출력 전류 i_{oc} 의 120Hz 성분 전류에 상쇄되어 배터리에는 DC전류만 흐르는 것이 가능하다. 그림 5는 제안하는 OBC의 단상 동작 APD의 등가회로이며, 2상 인터리브드 벡 컨버터와 동일하다. A상 모듈과 B상 모듈의 병렬연결을 등가화 하여 120Hz성분과 DC성분을 갖는 전류원으로 나타내었다. 그림 6(a)는 단상 동작 시 A상과 B상 모듈의 제어 블록도를 나타낸다. 1차측 스위치는 0.5 고정듀티로 스위칭하며, 2차 측은 계통 전압 전류를 제어하며 1차 측과 2차 측의 위상차로 파워를 제어한다.그림 6(b)는 C상 모듈 APD의 제어 블록도를 나타낸다. 제어 방식은 배터리 측 전류를 센싱 받아 2차(120Hz), 4차(240Hz), 6차(360Hz)의 저주파 성분을 PR 제어를 통해 배터리 전류의 2고조파 성분을 제거한다.

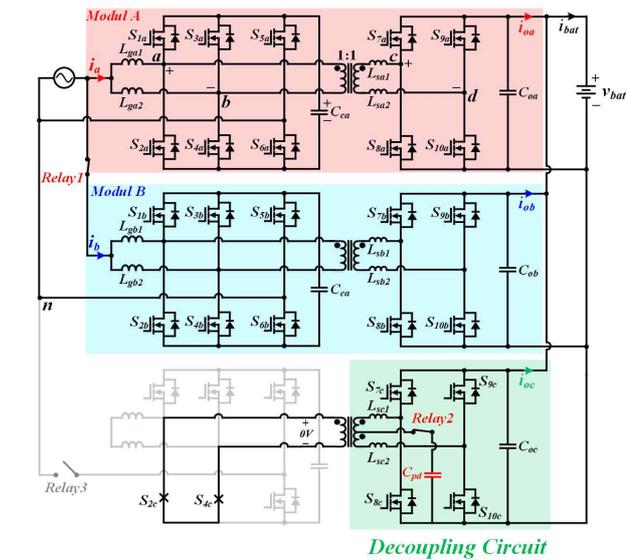


그림 3 APD를 적용한 단상 OBC

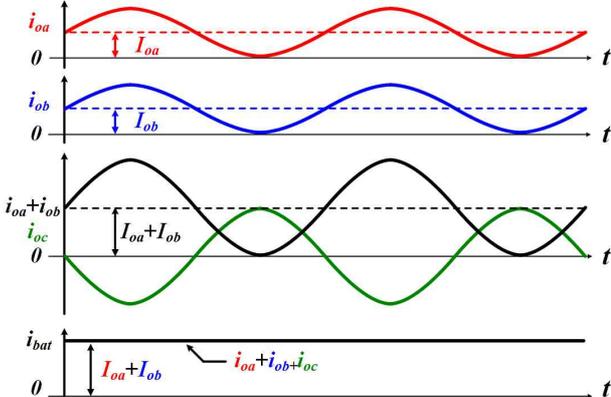


그림 4 단상 DC 충전 동작 원리

그림 7은 제안하는 컨버터의 계통 한 주기에서의 동작 파형을 나타낸다. 배터리 전류 파형 및 FFT를 통해 저주파 성분이 상쇄되는 것을 확인할 수 있다. 또한, Power decoupling 커패시터의 전압은 배터리 전압의 절반과 흡수한 2고조파 성분이다. 그림 8은 APD회로의 스위칭 주기 동작 파형을 나타낸 것이다. 2상 인터리브드 벡 컨버터 동작과 동일하며, 전 구간 DCM 동작으로 모든 스위치의 ZVS 동작을 성취한다. 또한, ZVS 동작을 위한 높은 리플 전류가 인덕터에 흐르는 반면, 커패시터에는 인터리빙을 통한 고주파 전류 리플이 상쇄되기 때문에 Power decoupling 커패시터의 전류정격이 증가하지 않는다.

3. 실험 결과

제안하는 OBC의 전체 시스템 시작품의 실험 구성은 아래와 같으며, 단상 동작 타당성을 위해 시작품과 AC 소스 그리고 저항부하를 이용하여 실험을 진행하였다.

- $P_o = 1kW$ • $V_g = 220Vac$ • $V_o = 400V$ • $f_s = 150kHz$

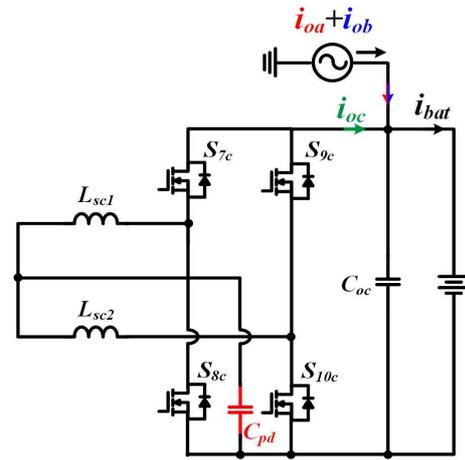
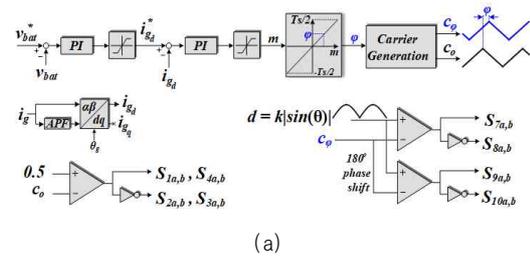
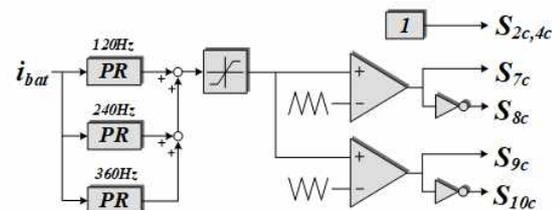


그림 5 단상 동작 등가회로



(a)



(b)

그림 6 (a) 단상 회로 제어 블록도 (b) Decoupling 제어블록도

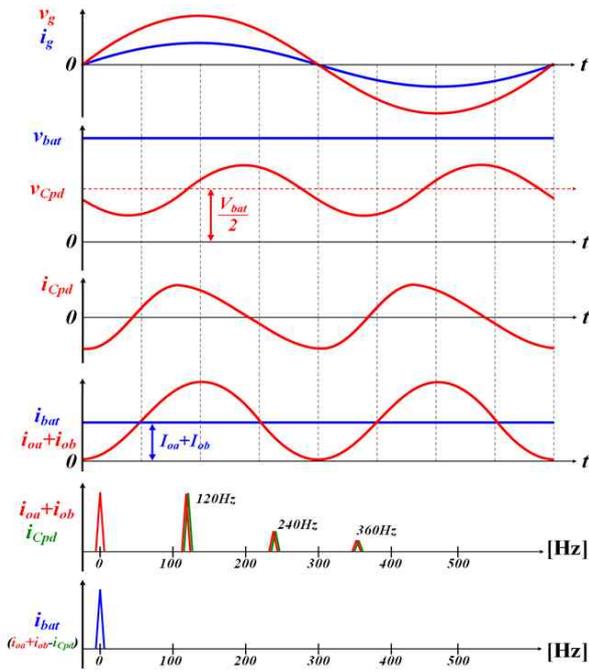


그림 7 계통주기의 단상 OBC 동작 파형

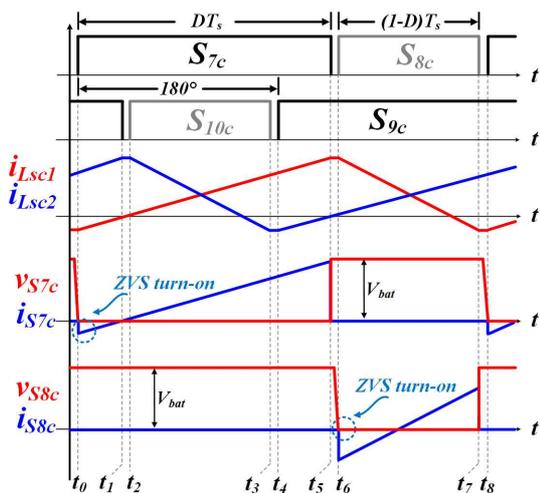
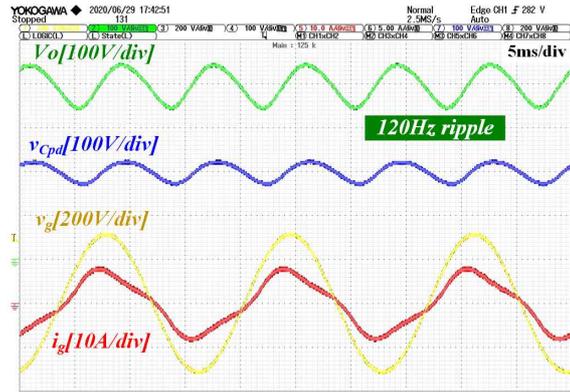


그림 8 스위칭주기의 APD 동작 파형

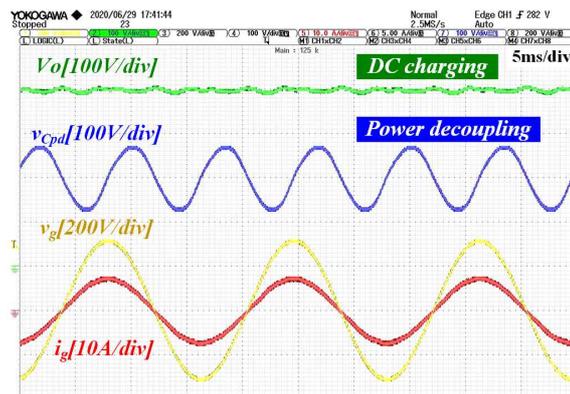
그림 9는 제안하는 OBC의 실험파형으로 계통 전압 및 전류, 배터리 측 전압, 디커플링 커패시터 전압 파형이다. 그림 9(a)는 디커플링 제어를 하지 않았을 때 출력에 120Hz의 성분을 확인할 수 있다. 그림 9(b)는 디커플링 동작 파형으로 출력은 DC이며, 120Hz의 성분이 모두 디커플링 커패시터에 저장되는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 전해 커패시터 없이 DC 충전 가능한 단상/3상 겸용 전기자동차 충전기를 제안하였다. 제안하는 컨버터는 출력전류에 포함된 120Hz 성분의 전류를 추가되는 스위치 없이 단상 및 3상 동작 시 저주파 성분이 없는 직류전류 충전이 가능하다. 제안하는 컨버터 및 Power decoupling 회로의 동작 원리를 제시하고 축소 시제품을 이용하여 본 논문의 타당성을



(a)



(b)

그림 9 실험파형 (a)AC-DC Without Power Decoupling

(b)AC-DC With Power Decoupling

검증 하였다. 최종 발표 시 11kW급 시작품으로 최적화 설계와 동작 타당성을 검증 할 예정이다.

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2020R1A2C2006301).

참고 문헌

- [1] U.S. DRIVE Department of Energy, "Electrical and electronics technical team roadmap," Oct. 2017. [Online].
- [2] 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.
- [3] X. Wang et al., "A 25kW SiC Universal Power Converter Building Block for G2V, V2G, and V2L Applications," 2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC), Shenzhen, 2018, pp. 1-6.
- [4] J. Lu, K. Bai, "A Modular-Designed Three-Phase High-Efficiency High-Power-Density EV Battery Charger Using Dual/Triple-Phase-Shift Control," IEEE
- [5] 김형진, 박준영, 함자벨카말, 라마단, 최세완, "전해커패시터 없는 단상/3상 겸용 11kW, 5.35kW/L 전기차 탑재형 충전기", 2020년도 전력전자 하계학술대회 논문집 2020.08