

전해콘덴서 없는 단상/3상 겸용 11kW, 5.5kW/L 전기차 탑재형 충전기

김형진, 박준영, 함자벨카멜, 라마단, 최세완
서울과학기술대학교

E-capless 11kW, 5.5kW/L EV On-Board Charger with Single and Three-Phase Grid Compatibility

Hyungjin Kim, Junyeong Park, Hamza Belkamel, Ramadhan, Sewan Choi
Seoul National University of Science and Technology

ABSTRACT

본 논문은 단상/3상 겸용 단일단 800V 전기차 탑재형 충전기를 제안한다. 제안하는 단일단 충전기는 넓은 단상/3상의 계통전압(120V-240V)에도 스위치의 ZVS 턴 온을 보장하며 전해콘덴서 없이 DC충전이 가능하다. 2상 인터리브드 토탈폴 구조로 구성되어 입력필터가 작으며 전해콘덴서가 없어서 5.5kW/L의 높은 전력밀도를 달성하였다. 또한 4차 고조파 주입 알고리즘을 통해 고조파 규정인 EN 61000-3-2 규정을 만족한다. 시작품의 타당성 및 성능 검증을 위해 SiC 소자를 적용하여 스위칭 주파수 150kHz의 11kW급 충전기를 제작하였고 제안하는 컨버터의 타당성 및 성능을 검증하였다.

1. 서론

최근 전기자동차의 충전시간 단축과 일회 충전에 따른 주행거리 연장을 위해 배터리 용량 증대에 필요성이 높아져 800V 배터리 팩을 갖는 전기차가 출시가 점차적으로 증가하고 있는 추세이다. 이에 따라 충전기의 모델이 용량별, 계통전압별, 배터리 전압별로 다양해져 제조사의 부담을 가중시킨다. 전기차 탑재형 충전기는 일반적으로 2단 방식의 PFC와 절연형 DC-DC컨버터를 주로 사용 중이다. 2단 방식은 소자 수가 많고 전해커패시터가 차지하는 비중이 커 전력밀도를 높이는 데 한계가 있다. 최근 충전기의 고전력밀도의 요구가 증가됨에 따라 단일단 방식의 충전기가 주목을 받고 있다^[1]. 단일단 방식은 소자수가 적고 전해커패시터가 없어 충전기의 고전력밀도를 달성하는데 유리하다. 하지만 표 1에서 볼 수 있듯이 계통전압이 120V에서 240V까지 넓은데 이 Voltage-fed 단일단 토폴로지는 DAB(Dual Active Bridge)로 동작하므로 입출력 전압의 차이가 커질수록 ZVS를 실패하기에^[2] 넓은 계통 전압 사양을 만족시키기 어렵다.

그림 1의 제안하는 토폴로지는 인터리브드 토폴 기반의 Current-fed DAB 방식으로서 스위치 개수가 적고 120V의 낮은 계통전압 공급 시에는 DAB의 입력전압(V_{Cca})을 승압시켜 240V의 조건과 동일하게 동작이 가능하다. 따라서 DAB의 입출력 전압의 차이를 줄일 수 있으므로 넓은 계통전압 조건에서

표 1. 유럽과 미국의 단상/3상 계통 사양

	미국	유럽
단상 계통	120V/12A (1.4kW) 240V/16A (3.8kW)	230V/32A (7.4kW)
3상 계통	240V/32A (22kW)	230V/32A (22kW)

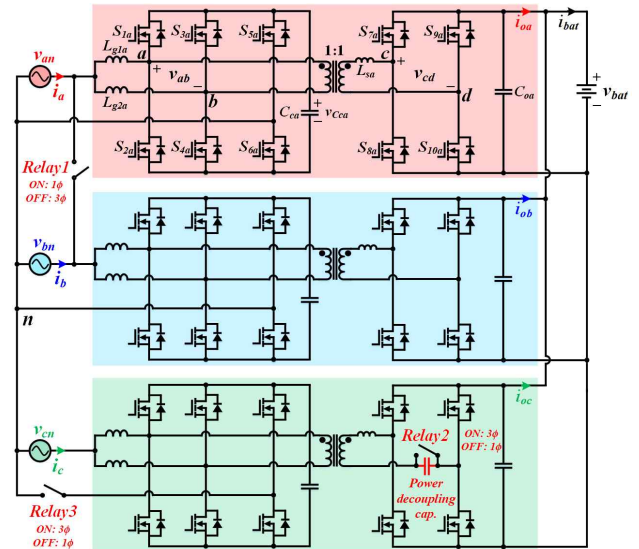


그림 1. 제안하는 단상/3상 겸용 단일단 전기차 탑재형 충전기

도 소프트 스위칭이 가능하다. 또한 제안하는 토폴로지는 1차 측 스위치의 듀티가 고정 0.5/0.7로 기존 단일단 방식에 비해 제어가 간단하며, 2상 인터리브드 토폴폴 동작을 하여 모든 스위치가 CCM ZVS를 달성하고 스위치 전류가 작기 때문에 도통손실이 작아 높은 효율 달성이 가능하며 리플 전류가 작고 계통의 제로 크로싱 부근에서 전류왜곡이 없다는 장점이 있다^[3]. 또한 4차 고조파 주입을 통해 EN 61000-3-2 고조파 규정을 만족하며, 단상/3상 계통에 연계 시 항상 DC충전이 가능하다.

2. 제안하는 단일단 충전기

2.1 제안하는 계통전압 크기에 따른 PWM 기법

그림 1은 제안하는 단상/3상 겸용 전해콘덴서 없는 단일단 전기차 탑재형 충전기 토폴로지를 나타낸다. 3상 계통이 연결되는 경우 Relay 2, 3이 턴 온 되어 동작하고 단상 계통이 연결되는 경우 Relay 1이 턴 온 되어 2개의 모듈이 병렬 연결되어서 7.4kW로 동작하고 나머지 1개의 모듈은 Power Decoupling으로 동작하여 배터리 충전 전류의 120Hz 성분을 흡수함으로써 DC충전이 가능하다.(자세한 단상 동작은 2020년도 전력전자학술대회 논문 [4] 참조) 계통 3상이 연결되는 경우 각 모듈에 3상 전압을 공급하여 개별적으로 동작한다. 각 모듈의 커패시터(Cca)는 2μF 이하의 필름커패시터로서 2상 CCM

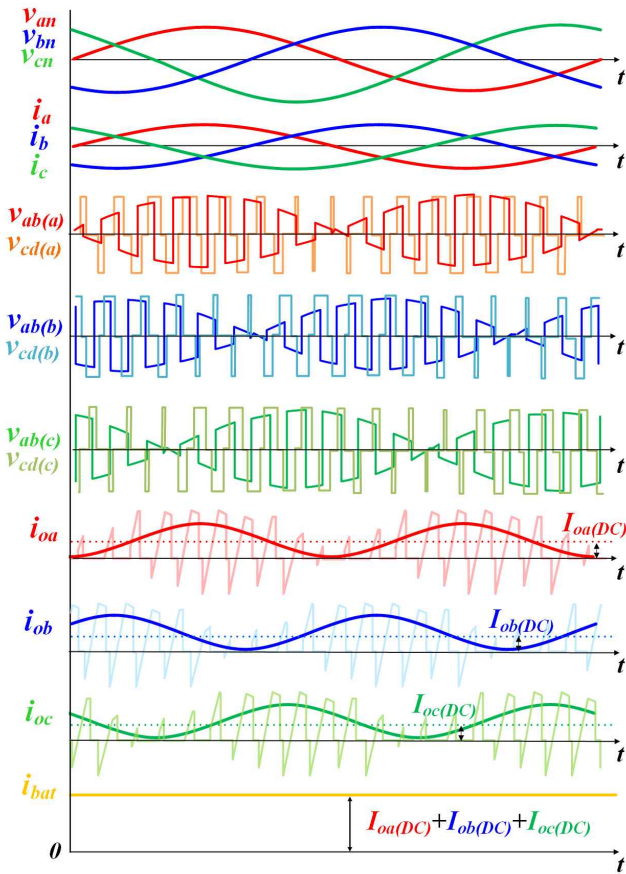


그림 2. 3상 단일단 충전기의 DC충전 원리

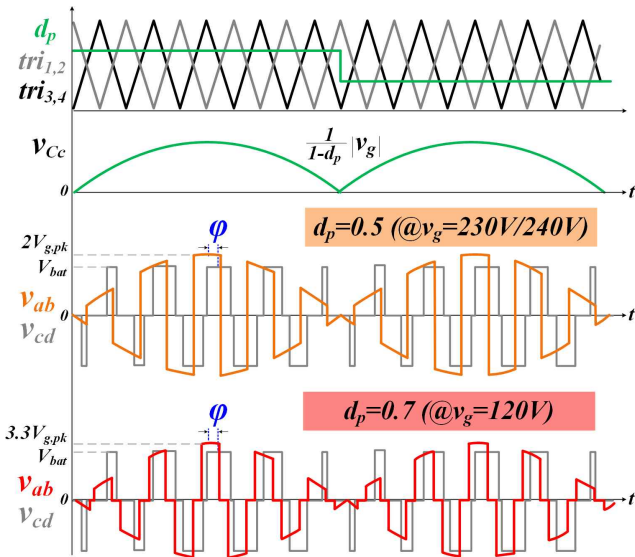


그림 3. 계통전압 크기에 따른 소프트 스위칭 기법

인터리브드 토탐폴 컨버터에 의해 정류된 계통전압이 나타난다. 그림 2는 DC충전이 되는 원리를 나타내는데 각 상의 충전기는 단일단 전력 변환을 하여 각 모듈의 출력전류에는 DC성분과 120Hz 성분으로 구성되어 있지만 각 상의 120Hz성분이 120도 위상차를 유지하므로 최종 배터리 충전전류는 DC성분만 존재하게 된다. 따라서 제안하는 충전기는 항상 DC충전이 가

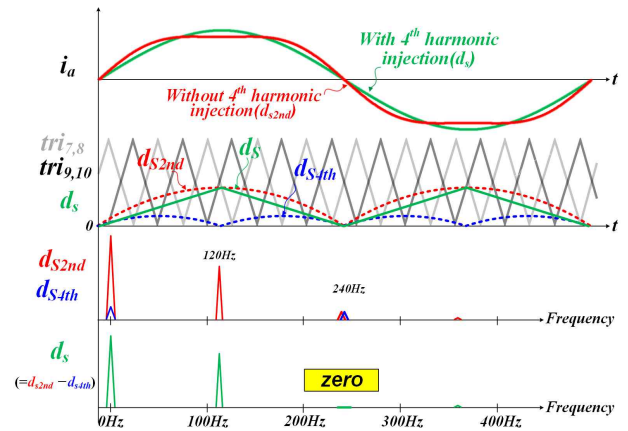


그림 4. 4차 고조파 주입 원리

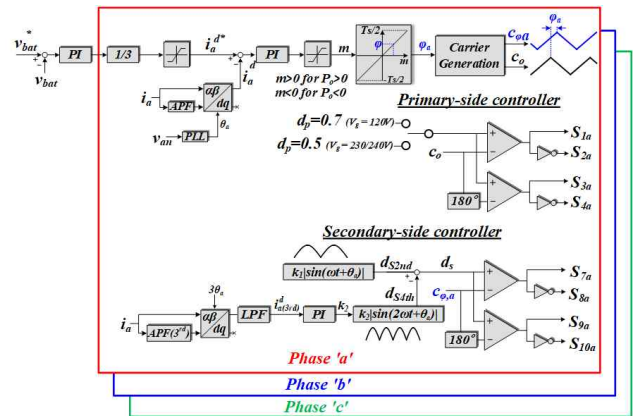


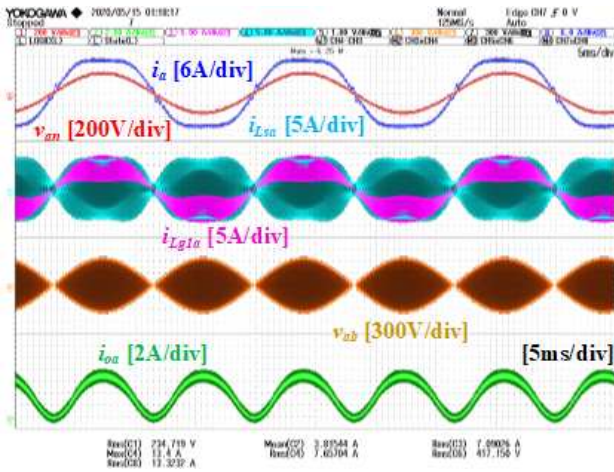
그림 5. 전체 제어 블록도

능하다.

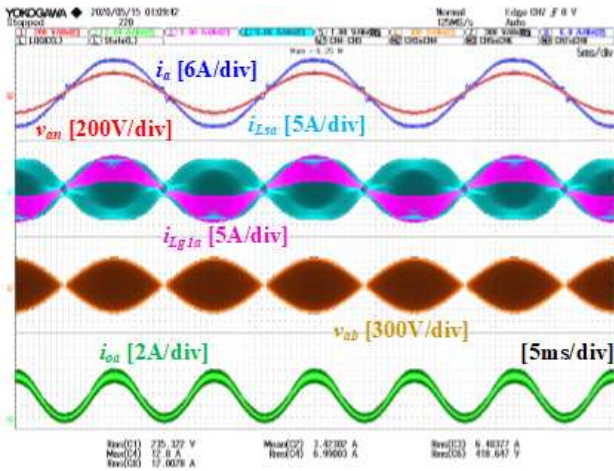
충전기 사양에서 계통 전압은 단상/3상 120-240V로 넓은 전압 범위를 가진다. 제안하는 단일단 방식의 토폴로지는 Voltage-fed 방식과 달리 Current-fed 방식으로 DAB의 입력 전압을 승압할 수 있는데 그림 3은 계통전압 크기에 따른 제안하는 충전기의 소프트 스위칭 기법을 나타낸다. 계통전압이 단상/3상 230V/240V인 경우에는 1차 측 듀티(d_p)를 0.5로 고정시켜 동작하여 ZVS를 성취할 수 있으며 단상 120V인 경우에는 배터리전압의 크기와 차이가 크므로 1차 측 듀티를 0.7로 증가시켜 DAB 입력 전압을 3.3배 증가시켜 배터리 전압과의 차이를 줄임으로서 ZVS를 성취할 수 있다.

2.2 4차 고조파 주입기법

충전기는 EN 61000-3-2 고조파 규정을 준수해야 하는데 제안하는 충전기는 2차측 스위치의 Modulation(d_{s2nd})에 의해 계통전류에 3차 고조파가 생성되는 문제가 있다. 이를 해결하기 위해서 그림 4와 같이 기존 2차 측 스위치 Modulation에서 4차 고조파를 주입(d_{s4th})하여 계통전류의 3차 고조파를 제거할 수 있다. 그림 5는 제안하는 충전기의 전체 제어 블록도를 나타낸다. 충전기는 각 상마다 독립적으로 제어되고 CC-CV 제어를 통해 배터리를 충전하고 전력제어는 1차 측과 2차 측의 위상차(ϕ)로 제어한다. 1차 측은 계통전압 크기에 따라 고정 듀티 0.5/0.7로 변경되고 2차 측은 PFC 수행을 위해



(a) 4차 고조파 주입 전, 각 부 파형(THDi 12%)



(b) 4차 고조파 주입 후, 각 부 파형(THDi 4.6%)

그림 6. 실험 파형

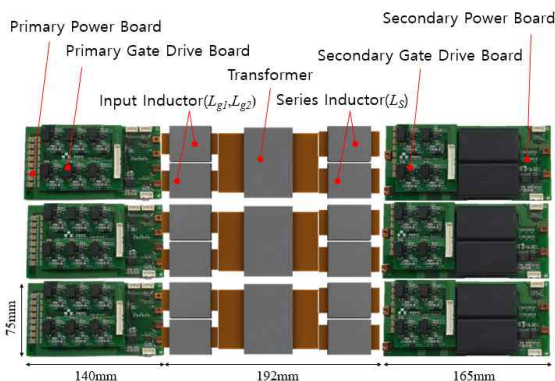


그림 7. 11kW급 단일단 충전기 1차 시작품 제작 사진(5.5kW/L)
(플라나 코어는 2차 시작품에 적용하여 학술대회에서 발표)

PLL에 의해 생성된 계통 위상으로 스위칭 하는데 이때 4차 고조파를 주입하여 계통전류의 3차 고조파를 제거함으로써 고조파 규정을 만족시킬 수 있다.

3. 실험 결과

제안하는 충전기의 타당성을 입증하기 위해 다음의 설계사양에 따라 실험을 진행하였다. 그림 7은 제안하는 11kW급 단일단 충전기의 1차 시작품 제작 사진을 나타낸다. 그림 6은 4차 고조파 주입 전과 후의 각 부 파형을 나타내며 4차 고조파 주입 전에는 전류 THD는 12%이고 고조파 주입 후에는 전류 THD는 4.6%로 이는 EN 61000-3-2 고조파 규정을 만족한다.

- $P_o = 11\text{kW}$
- $V_{an} = 120\text{--}240\text{Vac}$
- $V_{bat} = 460\text{--}800\text{Vdc}$
- $f_{sw} = 150\text{kHz}$
- $L_{g1,g2} = 30\mu\text{H}$
- $L_{sa} = 40\mu\text{H}$
- $C_{ca} = 1.6\mu\text{F}$
- $C_{oa} = 20\mu\text{F}$

4. 결론

본 논문에서는 단상/3상 계통 겸용 11kW급 전해콘덴서 없는 단일단 800V 전기차 탑재형 충전기를 제안하였다. 제안한 단일단 충전기는 넓은 계통전압 범위에 대해 소프트 스위칭이 가능하여 높은 효율을 기대할 수 있다. 또한 4차 고조파 주입을 통해 고조파 규정인 EN 61000-3-2를 만족하였다. 2상 인터리브드 토렘폴 구조로 입력필터가 작고 전해 콘덴서가 없어 높은 전력밀도를 달성할 수 있다. 3상 단일단의 경우는 DC충전이 가능하고 단상의 경우 2개의 모듈이 7.4kW로 동작되기에 나머지 1개의 모듈은 Power decoupling으로 동작하여 항상 DC충전이 가능하다. 시작품을 제작하여 본 논문의 타당성을 검증하였다. 최적화되지 않은 현재의 1차 시작품 효율은 94%이나 최적화를 거친 후 96% 이상의 효율 달성이 무난할 것으로 보인다. 현재 1차 시작품은 상용코어에 리츠와이어를 사용했으나 2차 시작품에서는 자성체 부분을 커스터마이징 플라나 코어로 제작하여 전력밀도를 5.5kW/L를 달성할 수 있다. 2차 시작품의 결과는 2020년도 전력전자학회학술대회에서 발표될 예정이다.

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

참고 문헌

[1] J. Lu et al., "A Modular-Designed Three-Phase High-Efficiency High-Power-Density EV Battery Charger Using Dual/Triple-Phase-Shift Control," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 9, pp. 8091-8100, Sept. 2018

[2] B. Zhao, Q. Song, W. Liu and Y. Sun, "Overview of Dual-Active-Bridge Isolated Bidirectional DC-DC Converter for High-Frequency-Link Power-Conversion System," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 8, pp. 4091-4106, Aug. 2014

[3] H. Belkamel, K. Hyungjin, K. Beywongwoo, Y. Shin and S. Choi, "Bi-Directional Single-Stage Interleaved Totem-Pole AC-DC Converter with High Frequency Isolation for On-Board EV Charger," 2018 *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Portland, OR, 2018, pp. 6721-6724

[4] 김선주, 이재연, 유기범, 최세완, "전해 커패시터없이 DC충전 가능한 단상/3상 겸용 전기자동차 충전기", 2020년도 전력전자 학회학술대회 논문집, 2020.8