

800V 전기 자동차용 GaN 기반 단상/3상 호환 22kW급 초고밀도 OBC 개발

배창규, 이한림, 이태일
HL 만도

Development of GaN-based single-phase/three-phase compatible 22kW ultra-high density OBC for 800V electric vehicles

Changkyu Bai, Hanlim Lee, Taeil Lee
HL Mando

ABSTRACT

본 논문에서는 800V 전기 자동차 (EV) 용 GaN 기반 모듈형 구조의 차량 탑재형 충전기 (OBC) 를 제안한다. 제안하는 OBC는 2단 기반의 단상 7.4kW급의 단위 모듈을 사용하므로 단상/3상 최대 22kW의 충전 전력을 공급하도록 확장할 수 있다. AC-DC 컨버터로는 인터리브드 토타폴 역률 보정 회로 (PFC) 를 적용하여 입력 전류 리플을 감소시켜 필터 사이즈를 줄인다. 절연형 DC-DC 컨버터로는 공진형 스택드 액티브 브리지 (R-SAB) 회로를 적용하여 800V 배터리의 높은 전압에도 불구하고 650V급 GaN 스위치를 적용할 수 있도록 한다. 제안된 R-SAB는 강압 및 승압 직렬 공진 회로 (SRC) 로 동작하며, 배터리 측의 넓은 출력 전압 이득 범위를 만족한다. GaN 스위치 적용을 통해 고주파 스위칭이 가능하여 AC-DC 측은 100kHz로, 절연형 DC-DC 측은 400kHz~1.3Mhz로 동작한다. 제안하는 22kW급 모듈형 OBC는 자동차용 시작품으로 제작되었으며, 4kW/L의 전력 밀도와 96.0%의 피크 효율을 달성했다.

1. 서론

지구 온난화와 기후 변화로 인해 전 세계 연료 소비가 증가함에 따라 기존 내연 기관 (ICE) 기반 차량을 생산하던 자동차 제조업체는 친환경 전기자동차 (EV) 기업으로 탈바꿈하고 있다. 하지만 전기자동차는 긴 충전 시간과 제한된 주행거리로 인해 활성화에 어려움을 겪고 있으며, 이에 따라 제조사들은 보다 큰 출력과 전력 밀도의 차량 탑재형 충전기 (On-Board Charger, OBC) 를 요구하고 있다. 따라서 OBC는 22kW급까지 용량이 확대되고 있다^[1].

11kW 및 22kW급 대응을 위해 널리 사용되고 있는 방식은 모듈러 구조의 단상/3상 호환 구조이다^[2-3]. 이는 3상 인버터 구조의 OBC와는 달리 단상과 3상 용량의 차이가 없이 모두 대응 가능하며 OBC 전력 용량의 확장이 용이한 점이 장점이다. 또한 DC링크 전압을 낮게 설계할 수 있어 650V급 GaN 소자를 사용할 수 있다. 800V 배터리 측 대응을 위해서는 다중레벨 토타폴로지인 스택드 하프 브리지 회로를 사용할 수 있어, 마찬가지로 650V급 GaN 소자를 사용할 수 있다^[4]. GaN의 고주파 동작은 자기 전력 부품의 크기를 줄일 수 있으며, 이는 OBC의 전력 밀도의 증가로 이어진다.

제안하는 22kW급 OBC는 7.4kW급 모듈의 3 병렬 구조이다. AC-DC 측은 입력 전류 리플이 낮아 수동 소자 사이즈를 줄일

수 있는 인터리브드 토타폴 역률 보정 회로 (PFC) 를 사용했다. DC-DC 측은 스택드 액티브 브리지 (R-SAB) 회로를 사용했다. 또한 LLC 및 CLLC 컨버터에 비해 주파수 가변 범위를 좁히기 위해 직렬 공진 강압 모드 확장 위상 천이 기법 (EPS) 과 직렬 공진 승압 모드 위상 천이 펄스폭 변조 기법 (PSPWM) 을 사용했다.

본 논문에서는 인터리브드 토타폴 PFC와 R-SAB를 적용한 22kW급 고밀도 OBC를 개발했다. 또한 3kW급 LDC를 통합하여 ICCU (Integrated Charging Control Unit) 차량용 시작품을 제작했다. 시작품에 대한 검증 시험을 진행하였으며, AC-DC 컨버터 정격 효율 98.1%, DC-DC 컨버터 최대 정격 효율 97.9%, 입력 220V, 출력 500~900V 환경에서 2단 통합 최대 정격 효율 96.0%를 달성했다.

2. 제안하는 22kW ICCU 시스템

2.1 제안하는 ICCU 전력 시스템 구성도

제안하는 ICCU의 시스템 구성도는 그림 1과 같다. ICCU는 OBC와 LDC를 단일 패키지에 통합시킨 제품으로 추가적인 전력 밀도 향상 및 단가 절감을 이뤄낼 수 있다. OBC의 AC-DC 컨버터의 경우 인터리브드 토타폴 PFC 회로를 적용하였으며, 절연형 DC-DC 컨버터의 경우 CLLC 공진 탱크의 R-SAB 회로를 적용하였다.

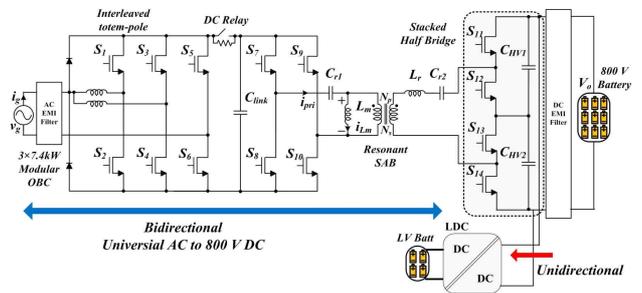


그림 1 제안하는 ICCU 시스템 구성도
Fig. 1 Proposed ICCU system configuration

2.2 AC/DC 부 회로 설계

2.2.1 인터리브드 토타폴 PFC

제안하는 AC-DC 컨버터의 경우 인터리브드 토타폴 PFC 회로를 사용한다. 인터리브드 토타폴 PFC의 경우 토타폴 PFC에 비해 전류 리플이 작아 입력 필터 사이즈를 저감할 수 있어

컨버터의 소형화에 유리하다. 그림 2는 100kHz 동작 시 단일 토템폴 PFC와 인터리브드 토템폴 PFC의 시뮬레이션 전류 파형이다.

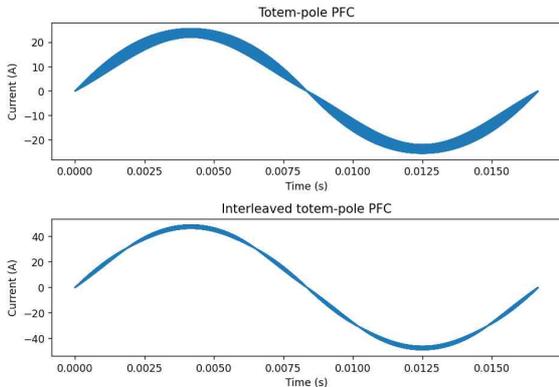


그림 2 인터리브드 토템폴 PFC의 전류 파형 시뮬레이션
Fig. 2 Simulation waveform of interleaved totem pole PFC Current

2.2.2 PFC 인덕터 소자 설계

인터리브드 토템폴 PFC의 인덕터 설계는 아래와 같다.

$$L_{ind} \geq \frac{V_{g,rms}^2}{(\%Ripple) * (P_{PFC}/2)} * \left(1 - \frac{\sqrt{2} * V_{g,rms}}{V_{link}}\right) * T_s \quad (1)$$

100kHz 기준 리플율이 20%일 때 최소 인덕턴스 조건은 145uH이다.

2.3 절연형 DC/DC 부 회로 설계

2.3.1 R-SAB의 강압 모드 동작 원리

강압 모드의 경우 R-SAB의 확장 위상 천이 기법 (EPS) 을 사용한다. 상세 동작 파형은 그림 3과 같으며 모든 스위치는 영 전압 스위칭 (ZVS) 를 성취한다. 이때의 1차측과 2차측의 위상 천이에 대한 시비율은 D_{sps} 로 정의하며 1차측의 내부 위상 천이 시비율은 D_{buck} 으로 정의한다.

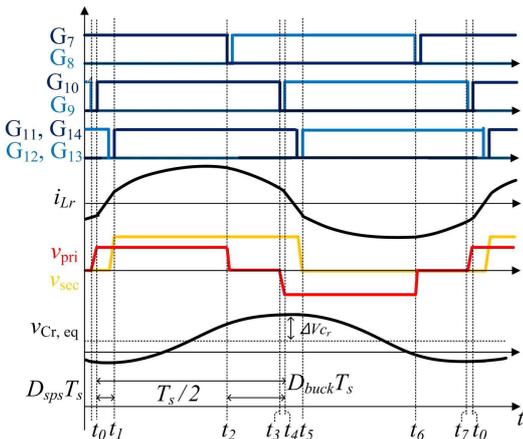


그림 3 강압 모드 확장 위상 천이 기법
Fig. 3 Buck mode EPS modulation

2.3.2 R-SAB의 승압 모드 동작 원리

승압 모드의 경우 R-SAB의 위상 천이 펄스폭 변조 기법 (PSPWM) 을 사용한다. 상세 동작 파형은 그림 4와 같으며 모든 스위치는 ZVS를 성취한다. 이때의 1차측과 2차측의 위상 천이에 대한 시비율은 D_{sps} 로 정의하며 2차측의 펄스폭 변조

시비율은 D_{boost} 로 정의한다.

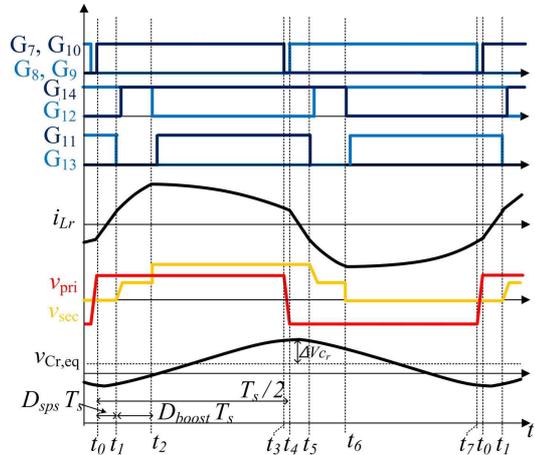


그림 4 승압 모드 위상 천이 펄스폭 변조 기법
Fig. 4 Boost mode PSPWM

2.3.3 가변 주파수 일정 오프 전류 제어 기법

상대-평면 궤적의 정상 상태 해석을 통해 제안하는 컨버터의 정의된 동작점을 찾을 수 있다. 1차측과 2차측의 위상 천이에 의한 스위치의 턴 오프 전류를 I_{ZVS} 로 정의하며 이는 ZVS를 하기 위해 필요한 에너지를 통해서 구할 수 있다.

$$I_{ZVS} \geq \frac{2C_{oss}(tr) V_{ds}}{t_{dead}} \quad (2)$$

그림 5는 I_{ZVS} 값을 만족하는 제안하는 R-SAB의 동작 위상 시비율이다. 그림 6은 주파수 및 이득에 대한 전력 그래프이다.

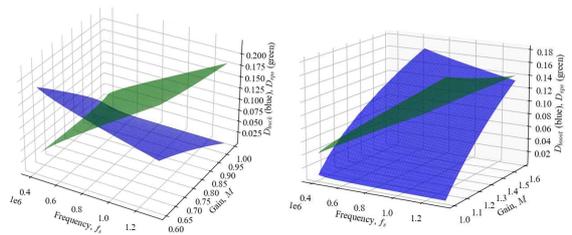


그림 5 f_s, M vs D_{sps} (초록), D_{buck} , D_{boost} (파랑)
Fig. 5 f_s, M vs D_{sps} (green), D_{buck} , D_{boost} (blue)

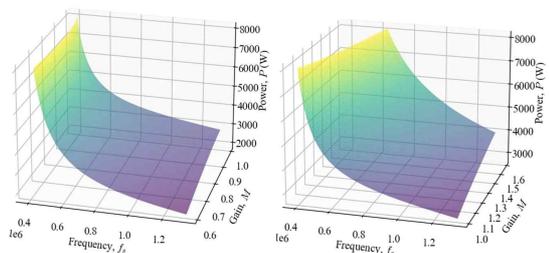


그림 6 3-d 그래프 f_s, M vs P
Fig. 6 3-d graph of f_s, M vs P

2.4 ICCU 패키징 설계

그림 7은 제안하는 ICCU의 시작품이다. 22kW급 모듈러 구조의 OBC와 3kW급 LDC가 하나의 패키지에 통합되어 있다. 제작된 시작품의 부피는 6.25L이며, 전력밀도는 4kW/L를 달성했다. Navitas社의 TOLT 패키지의 Top-side cooling GaN 소자인 NV6524와 NV6525를 통해 전력부 소형화가 가능했고, 이를 통해 고밀도 ICCU 설계가 가능했다.

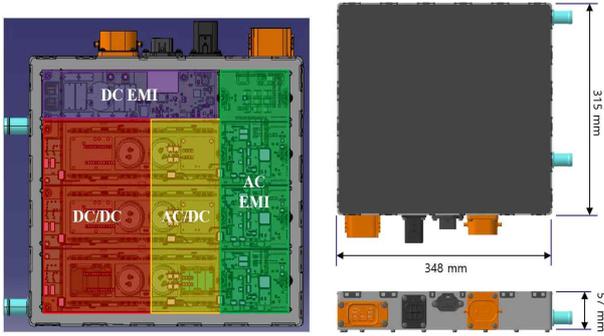


그림 7 제안하는 ICCU 시작품 (348mm*315mm*57mm)
Fig. 7 Prototype of proposed ICCU (348mm*315mm*57mm)

2.5 ICCU 실험 결과

제안하는 ICCU는 입력 전압 $220V_{ac}$, 링크전압 $400V_{dc}$, 출력 전압 $500\sim900V$ 환경에서 테스트했다. 그림 8은 정격 $7.4kW$ 의 AC-DC 컨버터 실험 파형이며 이때 효율은 98.1%를 달성했다. 그림 9는 정격 $7.4kW$ 의 DC-DC 컨버터 실험 파형이다. 강압 모드인 경우 96.8%, 승압 모드인 경우 96.8%, 1:1 모드인 경우 최대 효율 97.9%를 달성했다. 그림 10의 경우 제안하는 DC-DC 컨버터의 효율 측정 결과이다.

3. 결론

$800V$ 전기 자동차용 GaN 기반 단상/3상 호환 $22kW$ 급 초고 밀도 OBC를 개발했다. AC-DC 측은 $100kHz$, DC-DC 측은 $400kHz\sim1.3MHz$ 의 고주파 동작을 통해 고밀도화를 달성했다. 제안하는 OBC는 ICCU 패키지에 통합되어 자동차용 시작품으로 제작되었으며, ICCU 기준 $4kW/L$ 의 전력 밀도와 96.0%의 피크 효율을 달성했다. 추후 AC-DC 및 DC-DC 3 병렬 모듈의 통합 테스트 및 $3kW$ LDC 부분의 검증도 진행할 예정이다.

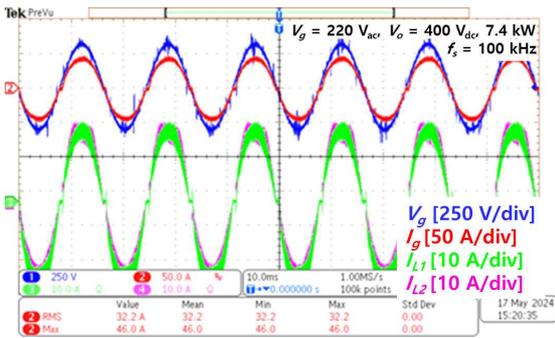
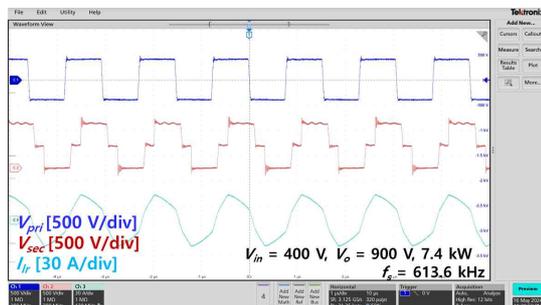
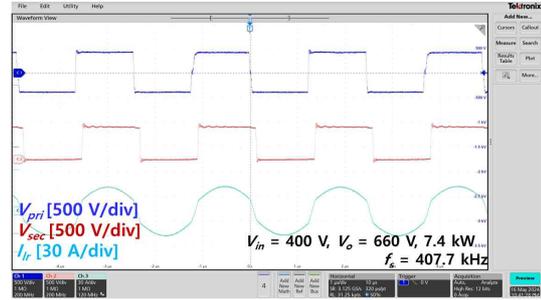


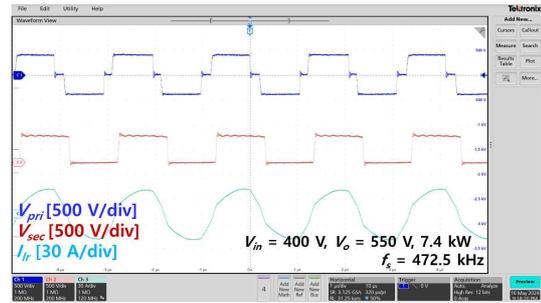
그림 8 제안하는 AC-DC 컨버터 실험 파형
Fig. 8 Experimental waveforms of AC-DC Converter



(a) $V_o = 900 V$, 승압 모드



(b) $V_o = 660 V$, 1:1 모드



(c) $V_o = 550 V$, 강압 모드

그림 9 제안하는 DC-DC 컨버터 실험 파형

Fig. 9 Experimental waveforms of proposed DC-DC Converter

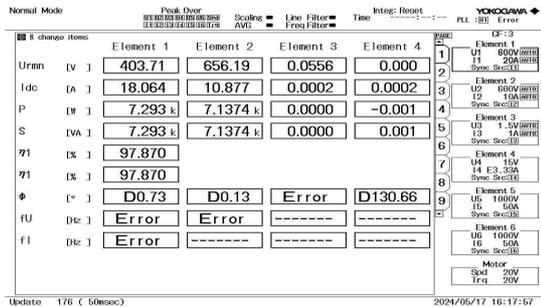


그림 10 DC-DC 컨버터 효율 측정

Fig. 10 DC-DC Converter efficiency

참고 문헌

- [1] H. Wouters and W. Martinez, "Bidirectional on-board chargers for electric vehicles: State-of-the-art and future trends," IEEE Trans. Power Electron., vol. 39, no. 1, pp. 693 - 716, Jan. 2024.
- [2] Texas Instruments, "GaN-Based, 6.6-kW, bidirectional, onboard charger." Accessed: Aug. 3, 2022. [Online]. Available: <https://www.ti.com/tool/PMP22650>
- [3] S. Mukherjee, J. M. Ruiz, and P. Barbosa, "A high power density wide range DC-DC converter for universal electric vehicle charging," IEEE Trans. Power Electron., vol. 38, no. 2, pp. 1998 - 2012, Feb. 2023.
- [4] M. Jia, H. Sun, J. Cai, H. Zhang, Z. Zhou, and J. Chen, "GaN and SiC Based 500kHz Resonant Bidirectional DC/DC Design for 800V OBCM Application," 2024 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Los Angeles, CA, USA, 2024.