

차세대 온보드 충전기를 구현한 7.4kW급 양방향 공진형 하이브리드 컨버터 개발

조문택*, 전지용**, 김영진**, 김귀한***, 문석환****

*대원대학교 전기전자과

**아주자동차대학교 미래자동차공학부

***주식회사 나오테크

****제주한라대학교 컴퓨터정보과

e-mail:kais@kais99.or.kr

Development of a 7.4kW Bidirectional Resonant Hybrid Converter Implementing an OBC

Moon-Taek Cho*, Ji-Yong Chun**, Yeong-Jin Kim**,

Gwi-Han Kim***, Suk-Hwan Moon****

**Dept. of Electrical and Electronics Engineering, Daewon University College

**Dept. of Future Automotive Engineering Ajou Motor College

***Naotech Co., Ltd

****Dept. of Computer Information, Cheju Halla University

요약

본 논문은 고효율, 고전력밀도, 양방향 전력 흐름을 모두 만족하는 차세대 OBC를 제시했다. GaN HEMT와 Planar Transformer를 혼합한 7.4kW급 양방향 공진형 하이브리드 컨버터를 설계하였다. 온보드 충전기(OBC)는 수백 kHz 이상의 고주파에서도 낮은 손실로 안정적인 스위칭을 구현했으며, 절연형 DC-DC 단계에 500kHz로 동작하는 풀브릿지 CLLLC 공진형 컨버터를 구성하여 시스템을 최적화하였다. 그 결과 전체 시스템에서는 7.4kW에서 96.5% 이상의 효율과 약 3.8[kW/in³]의 전력 밀도를 확인하였다.

1. 서론

온보드 충전기는 AC-DC PFC와 절연형 DC-DC 스테이지로 구성된다. PFC 단계는 교류 전력을 정류하고 전력 인자를 보정하여 약 400[V]의 DC 링크 전압을 형성하며, DC-DC 단계는 절연을 통해 차량 배터리 전압으로 변환한다. 그러나 기존의 실리콘 기반 MOSFET으로 구현된 충전기는 기술적 한계에 직면해 있다. 이로 인해 변압기와 필터의 대형화가 불가피해지며, 냉각부하 또한 가중된다. 결과적으로 Si 기반 OBC는 전력 밀도·소형화·발열 관리 측면에서 한계가 명확하다.

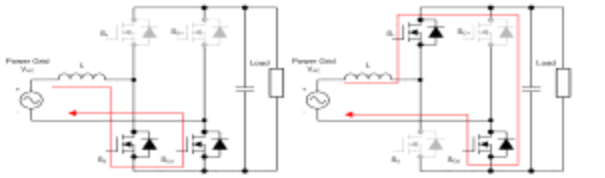
이러한 문제를 해결하기 위해 GaN HEMT가 주목받고 있다. GaN HEMT는 Si 대비 높은 임계 전계, 낮은 게이트 전하, 제로 역 회복 전하 특성을 지닌다. 그 결과, 수백 kHz~MHz 수준의 고주파에서도 낮은 손실과 안정적인 스위칭이 가능하다. 본 연구에서 Totem-Pole PFC와 500[kHz] 풀브릿지 CLLLC 컨버터에 적용하여 높은 효율을 실현하였다. 또한, 플래너 트랜스포머는 PCB 레이어 기반 권선 구조를 적용하여

저프로파일과 고밀도화가 가능하였다. 그 결과 3.8[kW/in³]의 전력밀도와 안정적인 열 분포를 달성하였다.

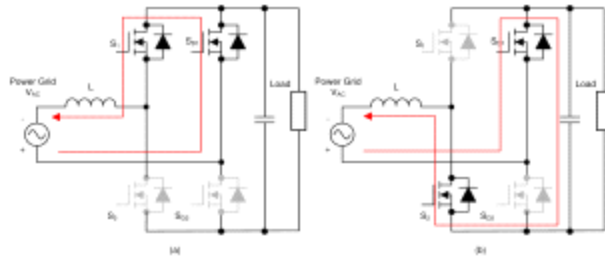
2. 회로의 동작원리 및 특징

2.1 Totem-Pole PFC 동작

Totem-Pole PFC는 고주파 GaN HEMT 스위치와 저속 보조 MOSFET으로 구성된 브릿지리스 구조를 선정하였다. 교류 입력을 받아 400V DC 링크 전압을 형성하며, 고속 GaN HEMT 스위치는 약 120kHz에서 동작하여 역률을 개선한다. 이 구조는 전류 루프 손실 저감과 도통 경로 단축을 통해 기존 브리지 기반 PFC 대비 약 1~2%p 효율 향상을 제공한다.



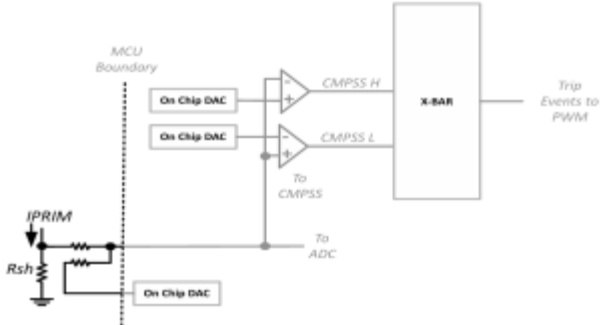
[그림 1] 양의 반주기 동안 토렘폴 브리지리스 PFC 작동



[그림 2] 음의 반주기 동안 토렘폴 브릿지리스 PFC 작동

2.2 제어 알고리즘

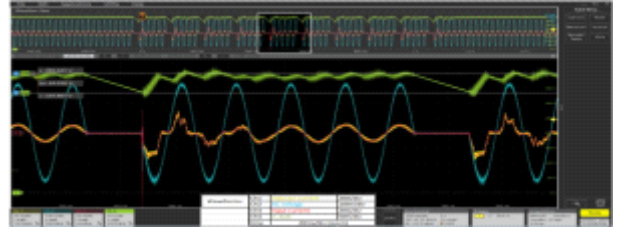
그림 3은 시스템의 제어 블록 다이어그램으로, 출력 전압 제어를 위한 외부 루프와 전류 제어를 위한 내부 루프로 구성된 계단식(cascaded) 제어 구조를 보여준다.



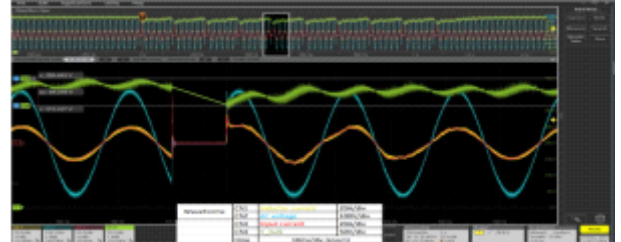
[그림 3] C2000MCU

Totem-Pole PFC는 양분할 상시 도통 방식의 전류 제어를 통해 동작한다. MCU는 교류입력 전압을 실시간으로 샘플링하여 참조 사인파(전류) 파형을 생성하고, 내부 전류 루프를 통해 고속 GaN 스위치의 듀티비를 조절함으로써 입력 전류를 이 참조에 따라 왜곡 없이 흐르도록 제어한다. 외부 전압 루프는 DC 링크 전압을 측정하여 오차를 계산하고, 전류 루프의 참조 크기를 조정함으로써 DC 링크 전압을 안정적으로 유지한다. 이러한 이중 루프 제어를 통해 PFC 단계에서는 0.99 이상의 높은 역률과 안정된 DC 링크 출력이 보장된다. 양방향 운전 시에는 제어 방향만 반대로 설정하여, V2G 모드에서는 DC 링크 전압을 일정하게 유지하면서 AC 측으로 전력을 송환하도록 PFC를 인버터 모드로 동작시킨다.

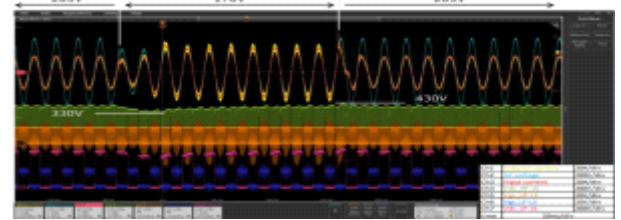
2.3 동작 파형 분석



[그림 3] 공진시 1차(ch2) 및 2차(ch3) 전류



[그림 3] 직렬 공진 주파수 이상의 1차(ch2) 및 2차(ch3) 전류



[그림 4] 직렬 공진 주파수 미만의 1차(ch2) 및 2차(ch3) 전류

그림 5, 그림 6, 그림 7은 스위칭 동작, ZVS/ZCS 확보 메커니즘, PCB 및 게이트 구동 설계 고려 사항을 중심으로 GaN HEMT의 동작 상태를 분석한 파형들을 나타냈다.

3. 결론

본 논문에서는 GaN HEMT와 플래너 트랜스포머 기반의 7.4kW 양방향 온보드 충전기 설계 및 성능을 상세히 분석하였다. 기존 Si 기반 충전기의 한계를 극복하고, 차세대 EV 충전기에서 요구되는 고효율, 고전력 밀도, 양방향 전력 흐름 지원을 모두 충족하는 것이다. 이를 위해 회로 토폴로지, 반도체 소자, 자기 부품, 제어 알고리즘에 이르는 시스템 전반의 최적화 설계를 수행하였다.

참고문헌

[1] W. J. Son, "Design of planar transformers for LLC converters in high power density on-board chargers," *Energies*, vol. 16, no. 18, 6757, 2023.

- [2] A. Reali, A. Alemanno, F. Ronchi, C. Rossi, and C. Florian, "Development of GaN-based 6.6 kW, 450 V bi-directional on-board charger with integrated 1 kW, 12 V auxiliary DC-DC converter with high power density," *Micromachines*, vol. 15, no. 12, 1470, 2024.
- [3] O. Bay et al., "A comprehensive review of GaN-based bi-directional on-board charger topologies for electric vehicles," *Energies*, vol. 16, no. 8, 3433, 2023.