

8kW/L, 700kHz 평면변압기를 이용한 GaN 소자 기반 친환경자동차용 LDC 개발 및 손실 분석을 통한 구조 설계

김규영¹, 김상진¹, Adhis¹, 최세완¹, 양대기², 홍석용², 이윤식³, 여인용³
 서울과학기술대학교¹, 데스틴파워(주)², 현대자동차(주)³

Development of 8kW/L, 700kHz GaN based Auxiliary Power Module using planar matrix transformer for xEV

Kyu-young Kim¹, Sang-jin Kim¹, Adhistira¹, Se-wan Choi¹,
 Dae-ki Yang², Seok-yong Hong², Youn-sik Lee³, In-yong Yeo³

Seoul National University of Science and Technology¹, Destin Power Inc², Hyundai Motors Inc³

ABSTRACT

본 논문은 친환경자동차용 저전압 DC-DC 컨버터 (Low-voltage DC-DC converter, LDC)의 고전력밀도 달성을 위한 스위칭 주파수 선정 및 구조 설계 방법을 소개한다. 위상 천이 폴-브릿지(Phase-Shift Full-Bridge, PSFB) 컨버터의 손실 분석을 통해 스위칭 주파수 700kHz 선정하였으며, 냉각수 온도 65°C, 분당 8리터의 유량 기준으로 소자 온도가 110°C 이내로 관리 되도록 고려하여 구조 설계를 수행했다. 온도 조건을 만족하면서 8kW/L의 높은 전력밀도를 달성하였으며 입력 전압 200V-310V, 출력전압 12.8V-15.1V의 전압 범위를 만족하는 1.8kW 최종 시작품을 제작하여 실험으로 검증하였다.

기의 변압기 턴비 보다 CD 정류기의 변압기 턴비가 절반으로 줄어들기 때문에 PCB 권선이 차지하는 단면적이 작아 고전력 밀도 달성이 용이한 PSFB-CD가 선정되었다. 또한 자속 상쇄 기법을 적용한 매트릭스 변압기를 이용하여 코어의 단면적과 2차측 PCB 권선 도통 손실을 줄여 이점을 더했다[2]. 그림 1은 매트릭스 변압기가 적용된 GaN 기반 PSFB-CD의 회로도도를 나타낸다. 컨버터의 높은 전력밀도 달성을 위해서는 손실 분석을 통한 적절한 스위칭 주파수 선정이 필요하며 소자의 온도 관리 및 효과적인 방열을 위한 구조 설계가 요구된다.

본 논문에서는 PSFB-CD 컨버터의 정격부하 기준 소자의 제한 온도 범위 내에서 고전력밀도 달성하기 위한 스위칭 주파수 선정 및 손실 분석을 통한 구조 설계에 대해 소개한다.

1. 서론

최근 고전력밀도 달성을 위해 와이드 밴드 갭(WBG) 소자인 질화 갈륨(GaN) 소자를 적용한 사례가 늘고 있다. GaN 소자는 기생성분에 민감하여 게이트 드라이버 설계에 어려움이 있지만 작은 게이트 전하량, 작은 출력 커패시턴스 및 역회복 손실이 거의 없어 고속 스위칭이 가능한 장점이 있다. 컨버터의 소형화 및 고효율 달성에 유리한 GaN 소자가 선정되었으며 토폴로지는 고주파 스위칭이 가능한 소프트 스위칭 컨버터인 액티브-클램프 포워드(ACF) 컨버터, 비대칭 하프-브릿지(ASHB) 컨버터, 위상 천이 폴-브릿지(PSFB) 컨버터가 후보군으로 검토되었다. PSFB 컨버터는 ACF 컨버터에 비해 낮은 스위칭 전압정격을 가지며 ACF, ASHB 컨버터에 존재하는 변압기 자화 전류의 오프셋이 없기 때문에 변압기 사이즈가 작아 고전력밀도 달성에 유리한 PSFB 컨버터로 선정되었다.[1]

PSFB 컨버터에서 2차측 정류 구조에 따라 센터탭(Center tap, CT) 정류기와 전류-더블러(Current Doubler, CD) 정류기가 비교되었다. CT 정류기는 적은 자성체 수, 유효주파수가 스위칭주파수의 2배인 장점을 갖지만 동일한 사양에서 CT 정류

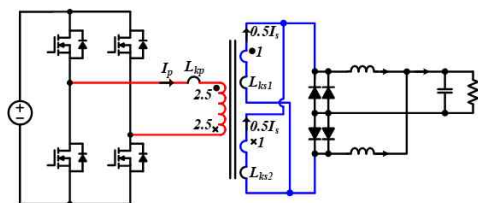


그림 1. 매트릭스 변압기가 적용된 PSFB-CD

2. 손실 분석을 통한 구조설계

높은 전력밀도 달성을 위한 설계는 컨버터의 정격 동작 중 온도 조건을 만족하는 범위 내에서 이뤄져야 하며 그 출발은 손실 분석에 있다. 선정된 PSFB-CD 컨버터의 손실은 1.GaN 소자, 2.정류 다이오드, 3.변압기 PCB 권선 4.변압기 코어, 5.인덕터에서 발생한다. 그림 2.(a)는 스위칭 주파수에 따른 GaN 스위치 손실과 온도 변화를 나타낸다. 700kHz에서 스위치의 총 손실은 23.51W로 예상되는 발열량은 106°C이며 실제 제작 마진을 고려해 700kHz로 선정되었다. 그림 2.(b)는 게이트 드라이버와 GaN 소자 간 기생성분을 최소화 하며 GaN 소자의 높은 방열 효과를 갖기 위해 게이트 드라이버 보드와 폴-브릿지 GaN 절연 금속 기판(IMS)보드를 2층으로 결합하는 구조로 설계되었다.

LDC는 높은 강압비로 인해 2차측에 대전류가 흐르게 되어 정류 다이오드의 손실이 크며 정격 부하에서 다이오드 도통손실은 97W이다. 그림 3.(a)는 1차 시작품에서의 Power board와

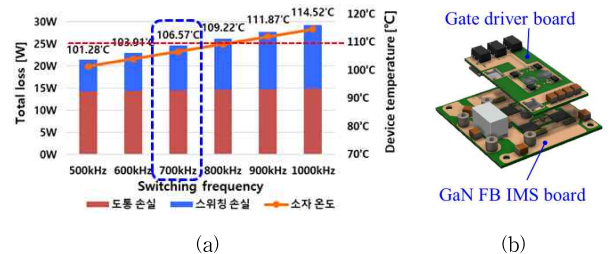


그림 2. (a) 소자 온도 제한에 따른 스위칭 주파수 선정 포인트 (b) Driver board와 GaN Full-bridge IMS board 구조

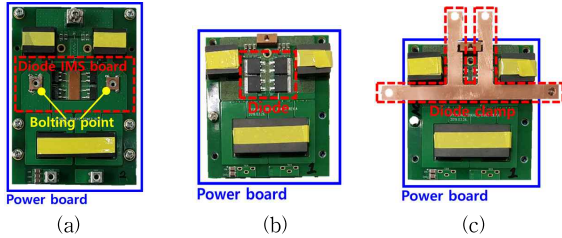


그림 3. (a) 1차 시작품, Power board + Diode IMS board 구조 (b) 최종 시작품, 정류부가 포함된 통합형 Power board (c) 클램프 적용 모습

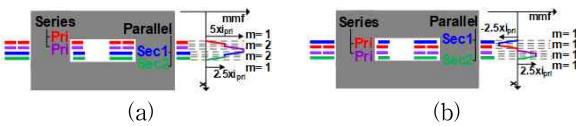


그림 4. 권선 방식 따른 변압기 단면도와 mmf 추이 (a) 일반적인 권선 방식 (b) 부분 인터리빙 권선 방식

Diode IMS board가 체결되는 2층 구조를 나타낸다. IMS board를 사용하여 소자의 온도는 105°C로 목표 온도를 만족했지만 2개 board의 체결 구조로 인한 복잡성 및 Diode IMS board 공간 확보로 인한 컨버터의 길이 증가, 가격 상승 및 전력밀도 측면에서 구조 단순화가 요구되었다. 그림 3.(b)는 다이오드를 Power board에 올린 최종 시작품의 통합형 Power board를 나타낸다. IMS PCB에 비해 FR-4 PCB의 열저항이 높기 때문에 목표 온도 달성을 위한 추가적인 방열이 필요했다. 그림 3.(c)는 추가적인 방열을 위해 클램프를 적용한 구조를 나타낸다. 정격 부하 기준 50°C정도의 추가적인 방열이 가능한 클램프를 설계하여 목표 온도를 만족시켰다.

고전력밀도를 달성하기 위해 평면변압기와 고주파 사용 시 표피효과를 고려해 PCB 도체 두께를 선정해야 한다. 또 변압기 권선 AC저항(R_{ac})을 구해 권선의 손실을 계산하고 효과적인 방열을 위한 적절한 권선 배치가 필요하다. 도체 두께는 주변 온도와 주파수로 결정된 침투 깊이를 고려해 3oz로 선정되었다. 아래 식은 도체 손실 계산에 필요한 R_{ac} 를 나타낸다.

$$R_{ac} = R_{dc} \frac{\xi}{2} \left[\frac{\sinh \xi + \sin \xi}{\cosh \xi - \cos \xi} + (2m - 1)^2 \frac{\sinh \xi - \sin \xi}{\cosh \xi + \cos \xi} \right]$$

계산에 필요한 값은 1.도체 두께와 침투 깊이의 비율 ξ , 2.DC저항, 3.PCB권선 각 층의 기저력(mmf) 변화량을 나타내는 m 이다. R_{ac} 는 m 에 비례하기 때문에 층마다 m 을 최소화하는 권선 방식이 필요하다. 그림 4는 권선 방식에 따른 변압기 단면도 및 mmf 변화량을 나타낸다. mmf는 전류, 턴비 및 권선 구조에 의해 결정된다. 그림 4.(a)는 일반적인 권선 방식의 변압기 단면도를 나타낸다. 이 방식의 경우 2,3층 $m=2$ 로 큰 손실이 예상된다. 그림 4.(b)는 부분 인터리빙 권선의 변압기 단면도를 나타낸다. 모든 층의 $m=1$ 로 권선 방법 경우의 수 중에서 가장 작은 R_{ac} 를 가져 PCB 권선 손실이 가장 작다. 또 대전류가 흐르는 2차측 권선이 외층에 배치되어 방열효과가 좋은 부분 인터리빙 권선 방식으로 설계하였다. 1차측 $R_{ac}=0.033\Omega$, 2차측 $R_{ac}=1.1m\Omega$ 로 계산되었다. 따라서 변압기 권선 손실은 18W로 계산되었다.

3. 실험결과

그림 5.(a)는 방열 클램프 적용 전 $V_{in}=270V$, $V_o=13.9V$

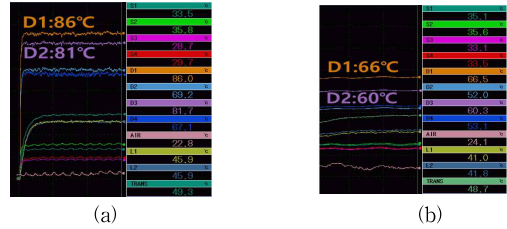


그림 5. 최종 시작품 온도 측정 파형(냉각수 온도 20°C/분당 4리터 유량) (a) 방열 클램프 없는 경우 (b) 방열 클램프 있는 경우

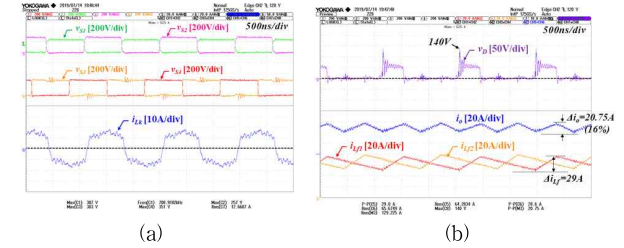


그림 6. 실험 파형($V_{in}=270V$, $V_o=13.9V$, $P_o=1.8kW$) (a) 스위치 전압 및 1차측 전류 파형 (b) 다이오드 전압 및 인덕터 전류 파형

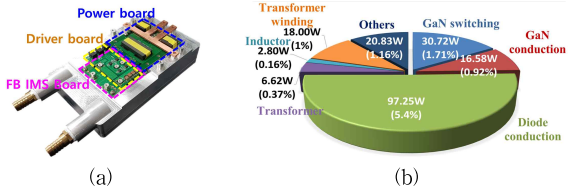


그림 7. (a) 1.8kW LDC 최종 시작품 (b) 정격 부하 손실 구성

$P_o=1.6kW$ 에서의 온도 파형을 나타낸다. 냉각수 온도 20°C을 기준으로 다이오드 최고 온도는 86°C로, 목표 온도를 만족하지 않는다. 그림 5.(b)는 방열 클램프를 적용한 $V_{in}=270V$, $V_o=13.9V$, $P_o=1.8kW$ 에서의 온도 파형을 나타낸다. 최고 온도는 66°C로 분당 5리터 유량으로 실험했기 때문에 목표 온도를 만족하여 설계된 클램프의 방열 효과를 검증하였다. 그림 6은 $V_{in}=270V$, $V_o=13.9V$, $P_o=1.8kW$ 에서의 실험 파형을 나타낸다. GaN 소자가 700kHz로 동작하고 모든 스위치가 ZVS를 성취하며 1kW에서 최고효율 90.1%, 1.8kW에서 89.3%를 달성하였다.

4. 결론

본 논문은 친환경자동차용 LDC의 고전력밀도 달성을 위해 PSFB-CD 컨버터의 손실 분석을 통한 700kHz의 스위칭 주파수를 선정하였으며, 소자 온도가 110°C 이내로 관리 되도록 구조를 설계 했다. Power board의 다이오드에 추가적인 방열을 위한 클램프를 적용해 온도 조건을 만족시켰다. 변압기 PCB 권선의 경우 mmf 변화량 및 방열 효과를 고려해 부분 인터리빙 권선으로 설계했다. 손실 분석을 통한 설계를 기반으로 제작된 1.8kW LDC는 8kW/L의 전력밀도를 달성했다.

References

- [1] 김상진, Adhistira, 김규영, 최세완, 양대기, 홍석용, 이윤식, 여인용. (2019). GaN소자 기반 8kW/L, 700kHz 전기자동차용 LDC 개발. 전력전자학회 학술대회 논문집, 68-70.
- [2] 김상진, Adhis, 김규영, 최세완, 양대기, 홍석용, 이윤식, 여인용. (2019). GaN소자와 평면변압기를 이용한 700kHz 차량용 DC-DC컨버터 개발. 전력전자학회 학술대회 논문집, 348-349.