

GaN소자 기반 8kW/L, 700kHz 전기자동차용 LDC 개발

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

Development of 8kW/L, 700kHz Low voltage DC-DC converter using GaN-HEMT

Sang-jin Kim¹, Adhistira¹, Kyu-young Kim¹, 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 8.1kW/L(132W/in³)의 전력밀도를 갖는 전기자동차(xEV)용 저전압 배터리 충전기(Low voltage DC-DC converter, LDC)를 위한 절연형 DC-DC컨버터의 설계 방법을 제안한다. 전체 부피 중 가장 큰 비중을 차지하는 자성체의 부피를 줄이기 위해 GaN소자를 채택하여 700kHz의 스위칭 주파수를 적용하였으며, GaN 스위치를 고주파에서 원활히 동작시키기 위한 게이트 드라이버를 직접 제작하였다. 또한 자속 상쇄 개념이 적용된 매트릭스 평면 변압기를 설계하여 적용함으로써 변압기의 부피를 크게 줄일 수 있었고, 8.1kW/L의 전력밀도를 달성하였다. 본 논문에서는 후보 토폴로지들의 비교를 통해 고 전력 밀도에 가장 적합한 토폴로지를 선정하였으며, 자속 상쇄 기법이 적용된 매트릭스 평면 변압기의 설계방법을 제안하였다.

1. 서론

화석연료가 고갈되어 감에 따라 환경 친화적이고 대체 자원을 동력으로 하는 자동차의 수요가 증가함에 따라 전기자동차가 각광받고 있다. 또한 전기 자동차의 계기판, 네비게이션, 휴대용 충전기 등의 차량 내부에서 사용 가능한 전자 제품의 수가 증가함에 따라 제한된 공간에서 높은 전력을 출력하기 위해 저전압 배터리를 충전하는 절연형 DC-DC 컨버터(Low voltage DC-DC converter, LDC)의 높은 전력밀도가 요구되고 있다 [1],[2]. 이러한 추세에서 최근 실리콘 카바이드(SiC) 및 갈륨 나이트 라이드(GaN)와 같은 와이드 밴드 갭(WBG) 기반의 전력 반도체의 상용화는 LDC의 무게와 크기를 줄이는 원동력이 되고 있다.

본 논문에서는 대전류, 고주파 응용에서 8.1kW/L(132W/in³)의 높은 전력밀도 달성을 위해 적합한 토폴로지를 선정하기 위해 3가지 토폴로지들을 비교하였다. 목표 전력밀도 달성을 위해 700kHz의 스위칭 주파수를 적용하였으며 입력전압 200V-310V, 출력전압 12V-15V사양에서 목표 사양을 만족시키기 위해 가장 적합한 DC-DC컨버터로 위상천이 풀-브릿지(Phase Shift Full-Bridge, PSFB) 컨버터가 선정되었다. 또한 자속 상쇄 방식의 평면 변압기를 적용하여 변압기의 크기를 줄였다.

2. 토폴로지 선정

넓은 입·출력 전압범위를 만족함과 동시에 높은 전력밀도 달성을 위해 액티브 클램프 포워드 컨버터(ACF), 비대칭 하프 브릿지 컨버터(ASHB), 위상천이 풀 브릿지 컨버터(PSFB)의 3가지 토폴로지 후보군의 특성을 비교하였다. 토폴로지의 비교는 스위칭 소자의 수, 자성체의 체적, 입·출력 전압 범위를 만족하기 위한 최대 누설 인덕턴스를 기준으로 수행되었으며, 입력전압 200V~310V, 출력전압 12.8V~15.1V, 스위칭 주파수 700kHz의 동일한 조건에서 비교되었다.

표 1은 3가지 토폴로지 후보군의 특성비교 결과를 나타낸다. ACF컨버터와 ASHB컨버터의 경우 스위칭 소자의 수 및 자성체의 개수가 PSFB 컨버터에 비해 적다는 특징을 가지고 있다. 하지만 ACF 컨버터는 듀티손실의 영향으로 스위치 전압정격이 크고, 변압기 자화전류의 DC성분으로 인해 자성체의 부피

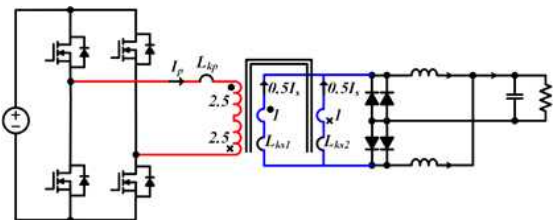


그림 1. 매트릭스 변압기가 적용된 PSFB

표 1. 토폴로지 비교

	ACF	ASHB	PSFB
Number of switches	2	2	4
Voltage rating of switch	$V_{in}+V_{Cc}$	V_{in}	V_{in}
Number of magnetics	1 transformer 1 inductor	1 transformer 1 inductor	1 transformer 2 inductor
Transformer turn ratio	4:1	5:1:1	5:1
Leakage inductance value	< 2uH	< 0.45uH	< 1.3uH
Magnetics footprint	4,502mm ²	3,890mm ²	2,157mm ²

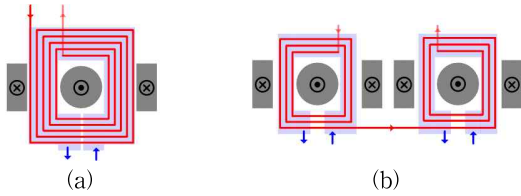


그림 2.(a) 기존의 평면 변압기 (b) 매트릭스 평면 변압기

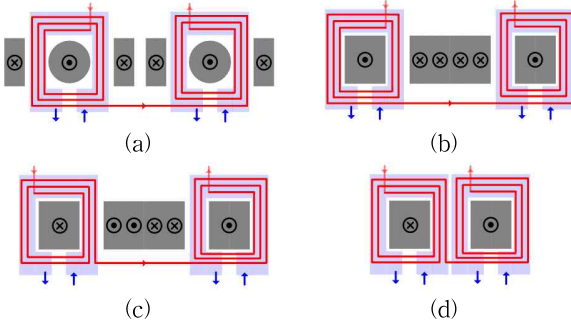


그림 3.(a) 두 개의 매트릭스 변압기 코어, (b) 단일 매트릭스 변압기 코어 (c) 자속 상쇄 기법이 적용된 단일 매트릭스 변압기 코어 (d) 제안하는 자속 상쇄 기법이 적용된 매트릭스 변압기의 코어

가 다른 토폴로지들에 비해 크기 때문에 높은 전력밀도를 성취하기 어렵다. ASHB 컨버터 또한 변압기 자화전류의 DC성분으로 인해 자성체의 부피가 크고, 누설 인덕턴스에 의한 듀티손실이 PSFB에 비해 크기 때문에 매우 작은 누설 인덕턴스가 요구된다. 따라서 세 토폴로지 중 자화전류의 DC성분이 없어 자성체의 총 단면적이 가장 작아 목표 전력밀도 달성에 가장 유리한 PSFB 컨버터로 토폴로지를 선정하였다. 또한 제한된 PCB 레이어 층수에서 큰 턴비를 사용할 경우 변압기의 권선면적 및 누설 인덕턴스가 증가할 수 있기 때문에 작은 턴비를 사용할 수 있는 전류 더블러(Current doubler)구조를 사용하였다.

3. 자속 상쇄 기법을 적용한 평면 변압기 설계

그림 2.(a) 5:1의 턴비를 갖는 기존의 평면 변압기를 나타내고, 그림 2.(b)는 각각의 변압기가 2.5:1의 턴비로 구성된 매트릭스 평면 변압기를 나타낸다. 여기서 매트릭스 변압기란 두 개의 코어에 1, 2차측 권선을 각각 직·병렬로 연결하여 하나의 변압기처럼 동작하도록 구성된 변압기를 의미한다. 평면 변압기는 PCB를 이용하여 권선을 구성하기 때문에 턴수에 비례하여 변압기의 단면적이 커진다는 단점이 있지만 매트릭스 평면 변압기를 사용하면 1차측 권선을 두 개의 변압기 코어에 분할하여 구성할 수 있기 때문에 효율적인 공간사용이 가능하다. 또한 2차측 권선을 병렬로 구성하여 전류 분담효과로 2차측 권선의 면적을 줄일 수 있으며 등가 누설 인덕턴스가 감소하여 듀티손실을 최소화 할 수 있다.

하지만 매트릭스 변압기를 사용 할 경우, 두 개의 코어를 사용하게 되어 코어의 단면적과 손실이 두배로 증가한다는 단점이 있다. 따라서 자속 상쇄기법을 매트릭스 변압기에 적용하여 코어의 단면적과 손실을 반으로 줄였다 [3]. 그림 3은 자속 상쇄기법의 개념을 나타낸다. 그림 3.(a)는 두 개의 변압기 코어를 사용하여 구성된 매트릭스 변압기를 나타낸다. 여기서 사용된 두 개의 변압기 코어를 그림 3.(b)와 같이 하나로 통합하는 것이 가능하며 코어 단면의 자속밀도는 동일해야 하므로 그림 3.(a)와 그림 3.(b)의 코어 단면적은 동일하다. 여기서 코어 한

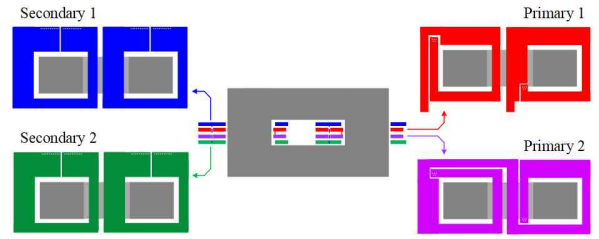


그림 4. 매트릭스 변압기 1, 2차측 PCB 권선 구성

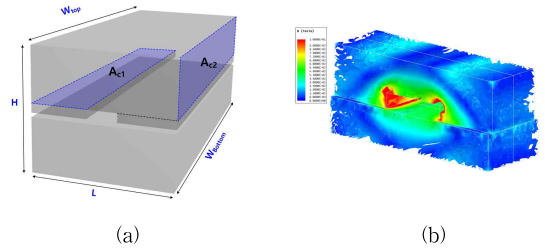


그림 5.(a) 제안하는 매트릭스 변압기 설계결과 (b) Maxwell 시뮬레이션 결과

쪽 다리에 구성된 1차측 권선의 방향을 반대로 구성하면 자속의 방향이 그림 3.(c)과 같이 바뀌어 코어 중앙 다리의 자속이 서로 상쇄되기 때문에 그림 3.(d)와 같이 코어를 구성할 수 있다. 아래 식 (1)과 (2)는 각각 그림 3.(a)와 그림 3.(d)의 코어 단면적(A_c)을 나타낸다.

$$A_c = \frac{\phi \cdot V_{in}}{\Delta B \cdot N_p \cdot f_s \cdot 360^\circ} \quad (1)$$

$$A_c = \frac{\phi \cdot V_{in}}{2 \cdot \Delta B \cdot N_p \cdot f_s \cdot 360^\circ} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)를 통해, 자속 상쇄방식을 적용하는 경우, 코어의 단면적이 절반이 되는 것을 확인할 수 있다.

그림 3.(d)와 같이 구성된 매트릭스 변압기의 1, 2차측 권선은 4층 PCB를 이용하여 그림 4와 같이 구성하였다. 변압기 2차측 권선은 냉각기를 통한 방열에 용이하도록 PCB의 외층에 배치하였으며, 1차측 권선은 PCB의 내층에 배치하였다. 그림 5.(a)는 설계된 코어의 3D도면을 나타내며, 설계된 코어와 권선을 바탕으로 Maxwell 시뮬레이션을 수행한 결과는 그림 5.(b)와 같다.

4. 실험결과

그림 6은 GaN 소자와 자속 상쇄개념이 적용된 평면변압기가 적용된 1.8kW 전기자동차용 LDC의 2차 시작품 사진을 나타낸다. 시작품은 크게 입력 공통모드(Common Mode, CM), 차동모드(Differential Mode, DM) 노이즈 필터와 GaN 스위치로 구성되어 있는 풀-브릿지 IMS보드, 게이트 드라이버 보드, 고주파 평면 변압기, 출력 인덕터, 정류 다이오드로 구성된 파워보드로 구성된다. 본 시작품은 85mm*152mm*17mm(가로*세로*높이)의 크기로 8.1kW/L(134.29W/in³)의 전력밀도를 달성하였다.

그림 7.(a)는 입력전압 200V, 출력전압 15.1V, 1.8kW상황에서의 실험결과를 나타내며, 4개의 스위치 모두 ZVS를 성취하는 것을 확인할 수 있다. 그림 7.(b)는 입력전압 310V, 출력전압 15.1V, 1.8kW상황에서의 실험 결과를 나타낸다. 이 경우에



그림 6. 1.8kW LDC 2차 시제품 제작 사진

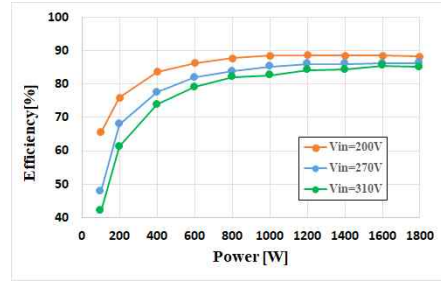
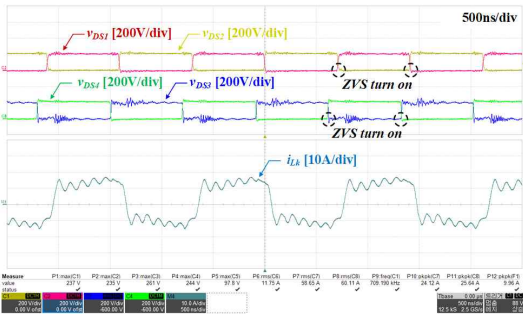
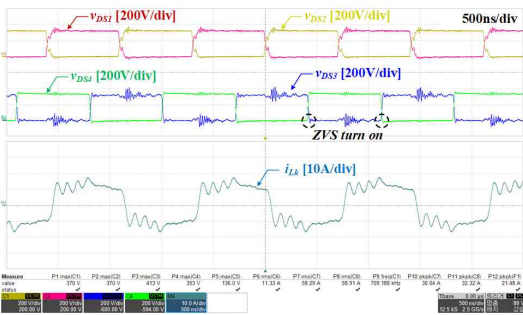


그림 8. 측정 효율($V_{in}=200V, 270V, 310V$)



(a)



(b)



(c)

그림 7. 1.8kW 정격 실험파형 (a) 스위치 전압 및 1차측 전류 파형($V_{in}=200V, V_o=15.1V$) (b) 스위치 전압 및 1차측 전류 파형($V_{in}=310V, V_o=15.1V$) (c) 출력 인덕터 전류 파형

는 변압기의 기생 캐패시턴스 성분으로 인해 충분한 데드타임을 주었음에도 S1, S2스위치만 ZVS를 성취하는 것을 확인할 수 있다. 그림 7.(c)는 변압기의 1차측 전류와 2차측 다이오드 전압을 나타낸다. 다이오드의 기생 캐패시터 성분과 누설 인덕턴스 성분의 공진으로 인해 변압기 1차측 전류와 2차측 다이오드 전압에 링잉이 생기는 것을 확인할 수 있다.

그림 8은 입력전압 200V, 270V, 310V 상황에서의 측정효율을 나타내며 입력전압 200V, 출력전압 15.1V, 출력전력 1.62kW에서 최고효율 88.5%를 달성하였다. 그림 9에서 확인할

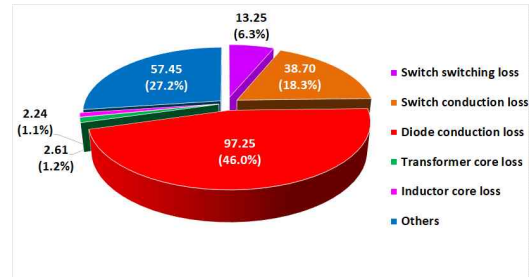


그림 9. 손실분석

수 있듯이, 대부분의 손실은 출력 다이오드에서 발생하는 도통 손실인 것을 확인할 수 있으며 추후 2차측 다이오드를 GaN 스위치로 교체하여 동기정류 방식을 통해 최고효율을 개선할 예정이다.

4. 결론

본 논문에서는 전기자동차 LDC 응용에서 높은 전력밀도를 갖기 위해 가장 적합한 토폴로지가 무엇인지 비교하였고, 설계 결과 자성체의 단면적이 가장 작은 PSFB 컨버터를 최종 토폴로지로 선정하였다. 또한 1차측 권선을 직렬, 2차측 권선을 병렬 연결한 자속 상쇄 개념 적용 매트릭스 변압기를 설계 및 제작하여 공간을 효율적으로 사용하였으며 등가 누설 인덕턴스를 줄일 수 있었다. 따라서 목표 전력밀도 달성을 위해 가장 적합한 토폴로지는 PSFB 컨버터였으며, 700kHz의 스위칭 주파수, 자속 상쇄 기법이 적용된 매트릭스 변압기를 이용하여 8.1kW/L의 전력밀도를 달성하였다.

References

- [1] A. Stippich *et al.*, "Key components of modular propulsion systems for next generation electric vehicles," in *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, vol. 2, no. 4, pp. 249-258, December 2017.
- [2] N. H. Kutkut, "A full bridge soft swiached telecom power supply with a current doubler rectifier," *Proceedings of Power and Energy Systems in Converging Markets*, Melbourne, Victoria, Australia, 1997, pp. 344-351.
- [3] D. Reusch and F.C. Lee, "High frequency bus converter with low loss integrated matrix transformer," *2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Orlando, FL, 2012, pp. 1392-1397.