

평면 변압기를 이용한 xEV용 GaN 기반 1.8kW 700kHz 절연형 DC-DC컨버터 설계

Adhis¹, 김상진¹, 최세완¹, 양대기², 홍석용²
 서울과학기술대학교¹, 데스틴파워(주)²

Design of 700kHz 1.8kW GaN-based Isolated DC-DC Converter for xEV using Planar Matrix Transformer

Adhistira¹, Sang-jin Kim¹, Se-wan Choi¹,
 Dae-ki Yang², Seok-yong Hong²

Seoul National University of Science and Technology¹, Destin Power Inc²

ABSTRACT

본 논문은 6kW/L(98W/in³)의 전력밀도를 갖는 xEV LDC를 위한 절연형 DC-DC컨버터의 설계 방법을 제안한다. 부피를 가장 많이 차지하는 수동소자의 부피를 줄이기 위해 GaN소자를 적용하여 스위칭 주파수를 700kHz를 적용하였다. 또한 자속 상쇄 개념이 적용된 매트릭스 평면 변압기를 적용하여 변압기의 부피를 크게 줄일 수 있었다. 본 논문에서는 후보 토폴로지들의 비교를 통해 고 전력 밀도에 가장 적합한 토폴로지를 선정하였으며, 자속상쇄 개념 기반의 매트릭스 평면 변압기를 설계방법을 제안하였다.

1. 서 론

최근 실리콘 카바이드(SiC) 및 갈륨 나이트 라이드(GaN)와 같은 와이드 밴드 갭(WBG) 기반의 전력 반도체가 상용화됨에 따라 xEV 응용에서 WBG 소자는 저전압 DC-DC컨버터의 무게와 크기를 줄일 수 있는 원동력이 되고 있다. WBG 소자의 높은 성능으로 인해 높은 스위칭 주파수를 사용하더라도 고효율을 달성할 수 있기 때문에 고효율, 고전력밀도가 요구되는 응용에서 WBG 전력 반도체가 널리 사용되고 있다 [1].

본 논문에서는 대전류, 고주파 응용에서 토폴로지 선정 시 6kW/L(98W/in³)의 전력밀도를 달성하기 위해 고려해야 할 중요한 측면에 대해 논의하고 후보 토폴로지들의 비교를 수행했다. 목표 전력밀도 달성을 위해 스위칭 주파수는 700kHz로 선정되었으며, 입력전압 200V-310V, 출력전압 12V-15V사양에서 목표 사양을 만족시키기 위해 가장 적합한 DC-DC컨버터로 전류-더블러(Current-Doubler) 방식의 위상천이 폴-브릿지 컨버터가 선정되었으며, 자속 상쇄 방식의 평면 변압기를 적용하여 변압기의 크기를 줄였다.

2. 토폴로지 선정

높은 전력밀도를 갖는 LDC를 위한 DC-DC컨버터 토폴로지를 선택할 때 고려해야 할 사항은 다음과 같다. 1. 스위칭 소자 수, 2. 수동소자 수, 3. 변압기의 1차측 턴 수. 변압기의 1차측 턴 수는 PSFB의 듀티 손실과 연관이 있는 누설 인덕턴스에 직접적인 영향을 미치기 때문에 토폴로지 선정에서 고려해야 할 중요한 측면이다.

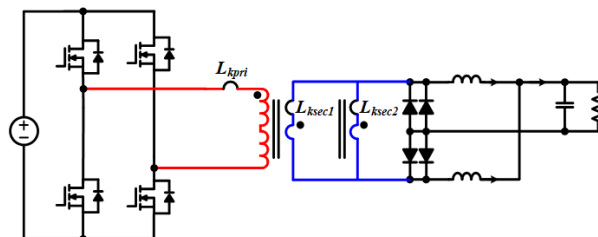


그림 1. 매트릭스 변압기가 적용된 PSFB-CD

표 1은 위상천이 폴-브릿지 전류-더블러(PSFB-CD), 위상천이 폴-브릿지 센터탭(PSFB-CT), 액티브 클램프 포워드(ACF)의 세 토폴로지의 비교 결과를 나타낸다. 세 토폴로지 중 ACF는 가장 적은 스위칭 소자수를 가지고 있지만, 변압기 자화전류의 오프셋으로 인해 변압기의 부피가 가장 커 목표 전력밀도를 만족하기 힘들다. PSFB-CT의 경우 세 토폴로지 중 인덕터의 부피가 가장 작고 변압기의 자화전류 오프셋이 없어 ACF에 비해 변압기 부피가 작지만, 변압기의 높은 턴비로 인해 PSFB-CD에 비해 자성체가 차지하는 면적이 더 크고, 높은 턴비로 인해 누설 인덕턴스로 인한 듀티손실이 커질 위험이 있다 [2]. PSFB-CD의 경우 세 토폴로지 중 자성체의 수가 가장 많지만 결과적으로 자성체가 차지하는 면적은 가장 작고, 낮은 턴비로 인해 누설 인덕턴스 제한값을 맞출 가능성이 가장 높기 때문에 PSFB-CD로 토폴로지를 선정하였다.

3. 자속상쇄 개념을 적용한 평면 변압기 설계

그림 1은 매트릭스 변압기로 구성된 PSFB-CT의 회로도를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 변압기의 2차측 권선이 서로 병렬로 연결되어 있어 정격전류의 절반만 2차 권선에 흐르게 된다. 따라서 2차측 권선의 면적을 줄일 수 있으며, 2차 권선이 병렬로 연결되어 누설 인덕턴스를 줄일 수 있다. 또한 1차측 권선이 직렬 연결되어 있어 2차측 인덕터 전류의 불균형을 피할 수 있다.

그러나 매트릭스 변압기를 사용하면 기존 변압기 대비 코어의 단면적이 두배가 된다는 단점이 존재한다. 따라서 코어의 단면적을 반으로 줄이기 위해 자속 상쇄 방식을 매트릭스 변압기에 적용하였다 [3]. 그림 2는 자속 상쇄 방법의 개념을 나타낸다. 식 (1)과 (2)는 각각 자속 상쇄 방식을 적용하기 전과 후의 코어 단면적(Ac)을 나타낸다. 식 (1)과 (2)를 통해 자속 상쇄방식을 적용하는 경우, 코어의 단면적이 절반이 되는 것을

표 1. 토폴로지 비교

Parameter	PSFB-CD	PSFB-CT	ACF
Number of semiconductor devices	4 switches 4 diodes	4 switches 4 diodes	2 switches 4 diodes
Number of magnetics	1 transformer 2 inductors	1 transformer 1 inductor	1 transformer 1 inductors
Transformer turn ratio	5:1	10:1:1	4:1
Leakage inductance value	< 1.2uH	< 1.2uH	< 2uH
Magnetics footprint	Transformer : 830.3mm ² Inductors : 1327mm ²	Transformer : 1800mm ² Inductors : 654mm ²	Transformer : 2246mm ² Inductors : 2256mm ²
Issues	1. Need to use two output inductors	1. Large turn-ratio	1. DC Magnetizing current offset. 2. Unbalance diode current

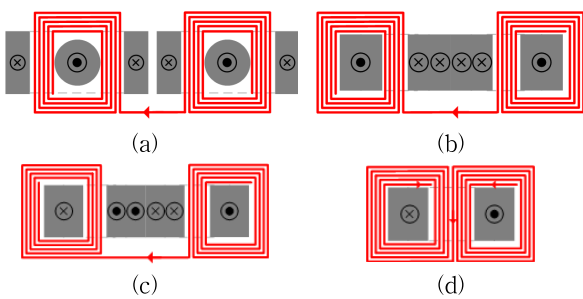


그림 2. (a) 두 개의 매트릭스 변압기 코어, (b) 단일 매트릭스 변압기 코어 (c) 자속 상쇄 기법이 적용된 단일 매트릭스 변압기 코어 (d) 제안하는 자속 상쇄 기법이 적용된 매트릭스 변압기의 코어



그림 3. 제안하는 매트릭스 변압기의 3D모델

확인할 수 있다.

그림 3은 설계된 변압기의 3D모델을 나타낸다. 코어의 상측면과 하측면은 Ac값을 154mm²을 유지한 상태로 코어의 높이를 25mm로 제한하기 위해 연장되었다. PCB 권선의 두께는 3oz PCB, 40A/mm²의 전류밀도를 가정하여 식 (3)을 통해 구할 수 있다. 그림 4는 자속 상쇄 기법이 적용된 매트릭스 변압기의 1차측과 2차측 권선 방법을 나타낸다. PCB의 상측면과 하측면은 대전류가 흐르는 2차측 권선의 두께를 줄이기 위하여 비아(Via)를 통해 연결 하였다.

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

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

4. 결 론

본 논문에서는 전기자동차 LDC 응용에서 6kW/L(98W/in³)

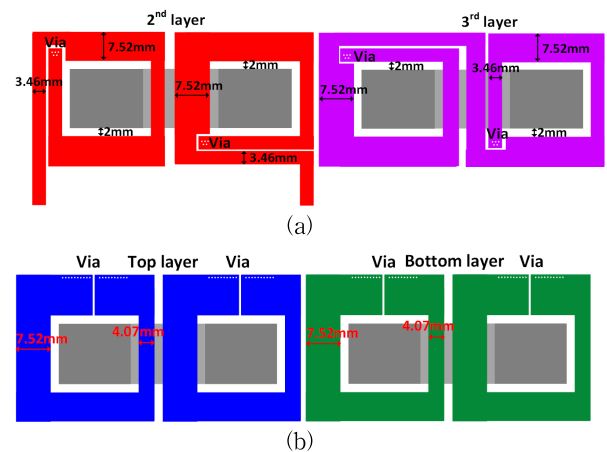


그림 4. 변압기 권선 구성방법 (a) 1차측, (b) 2차측

의 전력밀도를 갖기 위해 가장 적합한 토폴로지가 무엇인지 비교하였다. PSFB는 ACF와 달리 변압기 자화전류의 DC 오프셋이 없어 변압기의 부피가 작다는 장점이 있었다. PSFB-CD는 세 토폴로지 중 자성체의 수가 가장 많지만 턴 비가 낮고 변압기의 부피를 줄이는데 유리하다. 또한 2차측 권선을 병렬 연결하여 권선에 흐르는 전류가 작아 변압기의 부피가 작고, 등가 누설 인덕턴스가 가장 작아 고주파 응용에 가장 적합하다. 따라서 PSFB-CD가 높은 전력밀도를 갖는 고주파 LDC를 위해 가장 적합한 토폴로지였으며, 최종 발표시 1.8kW급 시작품을 제작하여 실험결과 및 달성 전력밀도를 제시할 예정이다.

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.