

3kW 부스트 컨버터의 SiC, GaN-HEMT 효율 비교 분석

김재민, 박상민, 주동명, 현병조, 노용수, 박준성
한국전자기술연구원 전력제어시스템 연구센터

Comparative Analysis of SiC, GaN-HEMT Efficiency of 3kW Boost Converter

Jae-Min Kim, Sang Min Park, DongMyoung Joo, Byoung Jo Hyon, Yong-Su Noh, Joon-sung Park

Power System Research Center, Korea Electronics Technology Institute (KETI)

ABSTRACT

최근 적용되고 있는 WBG(Wide Band Gap)전력 반도체는 스위칭 손실과 기생 성분이 작아 고속 스위칭이 가능하여 시스템의 효율 및 전력밀도를 높일 수 있다. WBG 소자를 적용한 전력변환장치의 최적화를 위해선 동작 환경을 고려한 SiC(Silicon Carbide)나 GaN-HEMT(Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor)의 정확한 손실 분석이 요구된다. 본 논문에서는 SiC 및 GaN-HEMT를 적용한 전력변환장치의 동작 환경별 손실 분석을 수행하고, 3kW급 부스트 컨버터 시제품의 실험을 통해 손실 분석의 정확도를 검증한다.

1. 서론

전 세계적으로 에너지 사용량이 증가하고 있으며 최근 해수면 상승, 기후 온난화 등 기후변화 문제가 갈수록 심각해지고 있다. 에너지 소비 고효율 및 이산화탄소 저감과 탄소 중립을 위한 기술이 매우 중요한 국제적인 이슈로 대두된다. 따라서 고전력 밀도 및 고효율을 갖는 전력변환장치의 필요성이 증가하고 있다. Wide Band Gap(WBG) 소자로 대표되는 SiC와 GaN-HEMT는 기존에 사용되던 MOSFET, IGBT 대비 우수한 동작 특성으로 이를 대체할 소자로 주목받고 있다. 구조 특성상 WBG 소자는 역 회복 시간이 없고 지속적인 새로운 제품을 통해 기생 커패시턴스 값이 작아지고 있어 고속 스위칭이 가능하고 도통 손실도 작으며 온도에 따른 소자 특성 변화가 작은 장점이 있다. 본 논문에서는 고효율 및 고전력 밀도를 달성하기 위한 GaN-HEMT 및 SiC를 적용한 3kW급 부스트 컨버터로 스위치의 특성을 고려하여 손실을 수식적으로 분석하였고 시제품을 개발하여 실험을 통해 이론값의 타당성 검증과 스위칭 주파수 가변에 따라 스위칭 소자를 변경하며 효율을 비교 검증하였다.

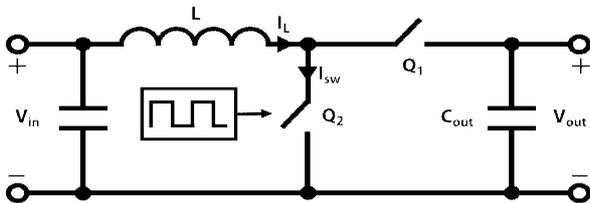


그림 1. 부스트 컨버터의 구성
Fig. 1. Configuration Of Boost Converter

2. SiC / GaN을 적용한 부스트 컨버터

2.1 회로구성

WBG 소자를 적용한 부스트 컨버터의 구성은 그림 1과 같고 ΔI_L 는 아래 식 (1)과 같다. 스위치 Q2의 Turn-On, Turn-Off 되는 시점의 전류의 크기($I_{sw,on}$, $I_{sw,off}$)는 인덕터 전류 평균값과 인덕터 전류 리플의 크기를 통하여 식 (2)와 같이 구할 수 있다. 각각 아래 식 (2)와 같다. 스위치 Q2에 흐르는 전류의 실효값 $I_{sw,rms}$ 은 듀티비 D 와 식 (1)을 이용하여 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta I_L = V_{in} DT_{sw}/L \tag{1}$$

$$I_{sw,on} = I_{L,avg} - 0.5 \times \Delta I_L, \quad I_{sw,off} = I_{L,avg} + 0.5 \times \Delta I_L \tag{2}$$

$$I_{sw,rms} = I_{L,avg} \sqrt{D \left(1 + \frac{1}{3} \left(\frac{\Delta I_L}{I_{L,avg}} \right)^2 \right)} \tag{3}$$

2.2 손실 분석

부스트 컨버터의 스위치에서 발생하는 손실은 크게 스위칭 손실과 도통 손실로 나누어지며 스위칭 손실은 소자의 E_{on} 또는 E_{off} 를 이용하여 아래 식 (4)와 같이 표현할 수 있다[1-2].

$$P_{sw} = (E_{on} + E_{off}) \times f_{sw} \tag{4}$$

본 논문에서는 데이터 시트를 활용하여 E_{on} , E_{off} 를 적용하였고 스위치에 흐르는 전류 실효값 $I_{sw,rms}$ 은 식 (3)을 통해 산출했다. 스위치의 도통 손실은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{cond} = R_{DS,on} \times I_{sw,rms}^2 \tag{5}$$

표 1 SiC / GaN-HEMT 부스트 컨버터의 동작 조건.

Table 1 Operating Conditions of SiC / GaN-HEMT Boost Converter.

구분	단위	CASE 1	CASE 2
정격용량	[W]	3000	3000
인덕턴스	[μH]	330	330
스위칭주파수	[kHz]	100	50
동작조건	-	입력:200V _{DC} , 출력:400V _{DC}	

본 논문에서 손실 분석을 수행한 동작 조건은 표 1과 같다. CASE 1, 2 조건으로 3kW에서 스위칭 주파수를 가변하였고 인덕터는 300 μ H로 설정 및 입력 전압 200V_{DC} 출력 전압 400V_{DC}으로 50%의 듀티로 산출하였다. SiC의 경우 ROHM사의 1200V/55A SCT3040KR을 적용했으며, GaN-HEMT의 경우 650V/55A TI사의 LMG3522R030을 적용했다.

표 2 SiC / GaN-HEMT 적용 부스트 컨버터의 손실 분석 결과
Table 2 Loss analysis results of SiC / GaN-HEMT Boost Converter.

구분	단위	SiC(ROHM_SCT3040KR)		GaN(TI_LMG3522R030)	
		CASE 1	CASE 2	CASE 1	CASE 2
부하 용량	[W]	3000	3000	3000	3000
스위칭 주파수	[kHz]	100	50	100	50
도통 손실	[Watt]	4.35	4.22	2.15	2.11
스위칭 손실	[Watt]	4.71	2.36	10.24	5.12
역 도통 손실	[Watt]	2.69	1.36	2.3	1.18
인덕터 손실	[Watt]	0.7	0.5	0.7	0.5
총손실	[Watt]	12.45	8.44	15.39	8.91
효율(산출값)	[%]	98.9%	99%	98.8%	99%

표 2는 SiC / GaN-HEMT 적용 부스트 컨버터로 스위칭 주파수를 가변하여 손실 및 효율을 도출하였다.

3. 실험 결과

3.1 손실 분석 검증용 시작품 개발

본 논문에서는 손실 분석 검증용 시작품을 그림 2의 제어부 (a)와 전력 변환부(b, c)로 구분하여 개발하였다. SiC 파워모드는 그림 2의 (b)와 같고 GaN-HEMT 파워모드는 그림 2의 (c)와 같으며 그림 2의 (a)의 제어부를 공용으로 사용했다.



(a)제어부(공용 사용) (b)SiC 적용 컨버터 (c)GaN-HEMT 적용 컨버터

그림2. 실험용 부스트 컨버터 시작품
Fig. 2. Configuration of Boost Converter.

표 3 SiC / GaN-HEMT 적용 부스트 컨버터의 손실 분석 결과
Table 3 SiC / GaN-HEMT Boost Converter experimental data comparison.

구분	단위	SiC(ROHM_SCT3040KR)		GaN(TI_LMG3522R030)	
		CASE 1	CASE 2	CASE 1	CASE 2
효율(산출값)	[%]	98.9	99	98.8	99
측정 효율	[%]	98.3	98.7	98.6	98.8
인덕터 손실	[%]	0.7	0.5	0.7	0.5
효율 오차	[%]	0.6	0.3	0.2	0.2

3.2 실험데이터 비교

손실 분석 검증용 시작품의 실험을 통해 측정된 효율은 표 3과 같고 실험 결과 표 2의 수식적으로 산출한 효율과 실험을 통해 산출한 효율 표 3을 비교하여 최대 0.6% 및 최소 0.2%의 오차를 갖는 것을 확인하였다.

3.3 스위칭 주파수 가변에 따른 효율 비교

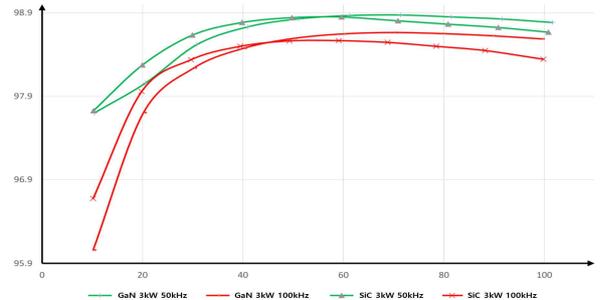


그림3. 스위칭 주파수 가변에 따른 효율 비교
Fig. 3. Efficiency Comparison by Switching Frequency variation.

본 논문에서는 3kW 조건에서 스위칭 주파수 가변에 따라 스위치 소자를 변경하며 효율 비교 실험을 진행했다. 스위칭 주파수 50kHz 부하 용량 0~60% 구간은 SiC가 효율이 높았으며 부하 용량 60% 이상의 구간에서는 GaN-HEMT의 효율이 더 높게 측정되었다. 스위칭 주파수 100kHz 부하 용량 0~45%의 구간은 SiC의 효율이 높게 나왔으며 부하 용량 45% 이상의 구간에서는 GaN-HEMT의 효율이 더 높게 측정되었음을 그림 3을 통해 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 SiC / GaN-HEMT를 적용한 부스트 컨버터를 수식적으로 산출한 손실 분석을 시작품 실험을 통해 실제로 측정된 손실 분석의 오차를 비교하였고 본 논문 실험에 사용한 부스트 컨버터는 하드 스위칭을 하는 구조로 스위칭 주파수가 낮을수록 효율이 높게 측정되며 WBG 소자를 사용하더라도 스위칭 주파수를 대폭 높이기 어려운 것을 확인할 수 있었다.

이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (20212020800020, 통합형 최적설계 플랫폼 기반 초고효율 전력변환시스템 개발)

참고 문헌

- [1] 한승훈, 양형규, 황대연, 주동명, 최준혁, “GaN-HEMT를 적용한 3kW급 LLC 공진형 컨버터의 손실 분석 및 개발” 전력전자학회논문지 pp.533-534, July, 2022
- [2] 이완희, 주동명, 박상민, 현병조, 최준혁, “GaN-HEMT를 적용한 3kW급 주택용 태양광 인버터 손실 분석” 전력전자학회 논문지 pp.365-366, July, 2021