

고효율 컨버터 개발을 위한 Si 및 SiC MOSFET의 비교 연구

강경필, 유안노¹, 조영훈, 최규하
건국대학교 전력전자 연구실, (주)LS 산전¹

Comparison of Si and SiC MOSFET for high efficiency converter

Kyoung pil Kang, ANNO Yoo¹, Y.H Cho, G.H Choe
Power electronics laboratory, Konkuk Univ., LSIS Co., Ltd¹

ABSTRACT

This paper compares physical characteristic of MOSFET based on Si and SiC to achieve high efficiency in converters using MOSFETs which are typical switching elements. Also, it compares a result to compare operating efficiency when DC/DC converter is switching with each element.

1. 서론

전력전자 장치의 대표적인 스위칭 소자로 사용되는 MOSFET은 실리콘과 금속 사이의 절연 산화물에서 전계를 조절하여 스위칭 동작을 수행하는 소자이다. 이상적인 스위칭 소자는 스위치의 온 오프 시에 손실이 발생하지 않으며, 스위치가 켜져 있는 시간동안 스위치 내부의 저항은 0이 되어 손실이 없다. 그러나 실제 소자들에는 각각의 저항성분들이 존재하며, 이들은 손실로 작용하여 시스템의 효율에 많은 영향을 미치기 때문에 시스템을 설계할 때 스위칭 소자의 물리적인 특성을 이해하고 적절한 소자를 선택하는 것이 필요하다.^[1]

본 논문에서는 동일한 실험조건에서 스위칭소자를 Si계열의 700V MOSFET에서 SiC계열의 1200V MOSFET로 변동시켜 보았을 때 컨버터의 효율에 어떠한 영향을 미치는지 실험을 실시하고 그 결과를 비교해 보았다.

2. Si 및 SiC MOSFET의 비교

SiC MOSFET는 실리콘(Si)에 같은 4족 원소인 탄소(C)를 화합하여 만든 화합물(SiC)을 웨이퍼로 하여 만든 MOSFET으로, 기존의 실리콘 기반의 MOSFET과 비교하였을 때 다음과 같은 장점이 있다.^[1]

SiC MOSFET은 Si MOSFET에 비하여 밴드갭 에너지(E_g) 및 열전도도가 크기 때문에 고온의 조건에서도 스위칭 동작이 가능하며, 절연과 파괴장도(E_B) 또한 높기 때문에 고압, 대전류의 가혹한 조건에서도 소자의 절연이 파괴되지 않고 동작할 수 있다. 이러한 우수한 특성으로 Si를 대체할 전력용 소자로 많은 연구가 이루어지고 있다. 그러나 아직 SiC 소자의 제작공정과정이 완숙하지 못하였고, Si계열의 소자에 비하여 SiC 소자의 가격이 비싸다는 단점이 있어 개선의 여지가 존재한다.^[2]

3. 실험

3.1 실험 구성

실험은 동일한 용량을 가지는 양방향 DC/DC 컨버터를 그림 1과 같이 구성하였으며, 컨버터 1차측과 2차측 사이의 변압기의 변압비는 380:380 이며, 변압기의 누설 인덕턴스의 값은 10uH이다. 또한 DC/DC 컨버터가 ZVS영역을 충분히 넓게 가질 수 있도록 추가적으로 인덕터를 변압기의 1차측에 연결하여 설계된 컨버터의 누설 인덕턴스 값을 조절 할 수 있도록 구성하였다. 입력 전원의 용량은 3.5kW 전원공급기를 통해 380V를 1차측에 공급하도록 하였으며, 2차측 컨버터의 출력전압은 400V가 되도록 실험조건을 구성하였다.

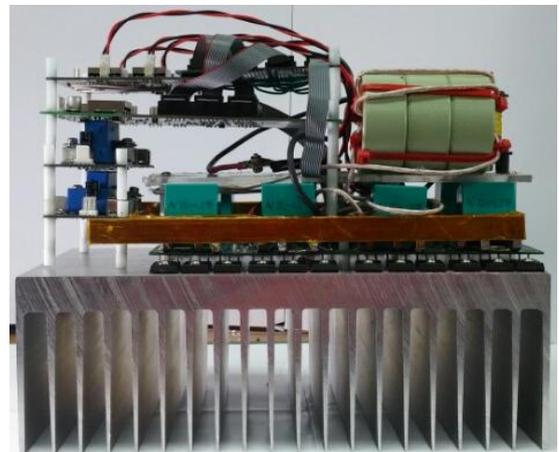


그림 1 DC/DC 컨버터 시스템
Fig. 1 A DC/DC converter system

표 1 실험 사양
Table 1 Specification of experiment

| 구분 | |
|---------|-----------|
| 입력전압 | 380V |
| 출력전압 | 400V |
| 변압비 | 380 : 380 |
| 스위칭 주파수 | 40kHz |
| 누설인덕턴스 | 80uH |

3.2 실험

실험은 출력전압과 출력전력을 동일한 기준으로 정하여 스위칭 소자의 변화가 컨버터의 효율에 어떠한 영향을 미치는지 두 스위칭 소자를 사용한 컨버터의 효율을 비교해 보았다. 컨버터의 제어는 오픈루프 방식으로 실시하였으며, 실험에 사용한 Si 소자는 Infineon사의 IPW65R041CFD를 사용하였으며, SiC 소자는 CREE사의 C2M0080120D를 사용하였다. 아래의 표 2는 Si MOSFET과 SiC MOSFET의 사양을 나타내었다.

표 2 실험에 사용한 소자 사양
Table 2 Specification of device

| 구분 | $V_{DS}[V]$ | $I_D[A]$ | $R_{DS(on)}[m\Omega]$ | $T_{rr}[ns]$ |
|-----|-------------|----------|-----------------------|--------------|
| Si | 700 | 68.5 | 41 | 250 |
| SiC | 1200 | 31.6 | 80 | 40 |

표 2에서 V_{DS} 는 각 MOSFET이 버틸 수 있는 최대 순방향 전압을 의미하여, I_D 는 소자의 내부 접합이 파괴 되지 않는 도통 전류의 최대치이다. $R_{DS(on)}$ 은 스위치 Trun on시 Drain Source사이의 저항 값이며, t_{rr} (Reverse Recovery time)은 스위치가 복구되는데 걸리는 시간이다. 표 2에 나타낸 소자의 물성은 시스템의 효율을 결정하는데 주요한 변수로서 작용한다.

4. 실험 결과 및 분석

모든 실험의 결과는 컨버터에 연결된 Power Analyzer 및 입,출력단에 연결된 고성능 멀티미터를 통하여 효율을 측정하여 기록하여 실험의 신뢰성을 기하였다. 그림 2는 출력전압 400V, 출력전력을 0W에서 3kW까지 변동시켜 보았을 때 Si 및 SiC 소자를 스위치로 사용한 각각의 컨버터 효율곡선이다.

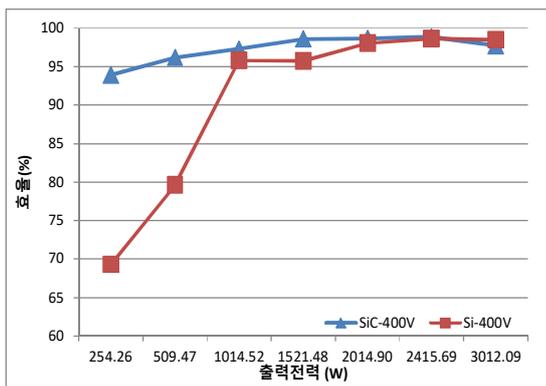


그림 2 출력전압 400V조건, 출력전압대비 효율곡선
Fig. 2 Efficiency per Watt curve at 400V output voltage

표 3 에서 출력전력 250[W] 에서의 Si의 효율은 69.31%이며 SiC를 사용한 시스템의 효율은 93.93%이다. 또한 3k[W]에서 Si의 소자의 효율은 98.51%이고, SiC소자의 효율은 97.73%이다. 실험 결과 Si로 스위칭한 컨버터는 1kW 미만의 저전력 구간에서 스위칭 손실이 크게 작용하여 효율이 낮고, SiC로 스위칭한 컨버터는 실험한 전체 전력 구간에서 90% 이상의 비교

적 일정한 효율변화를 보인다. 이러한 결과는 Si MOSFET의 t_{rr} (250ns)이 SiC의 t_{rr} (40ns)보다 오래 걸리기 때문에 스위칭 손실 효율감소에 크게 작용하게 되었다고 볼 수 있다.

출력이 2kW 이상으로 증가 할수록 Si MOSFET를 사용한 컨버터의 효율과 SiC MOSFET를 사용한 컨버터의 효율이 비슷하거나 Si를 사용한 컨버터의 효율이 좋게 나오는 지점들이 있다. 이는 Si 스위치와 SiC 스위치의 물리적인 특성인 $R_{DS(on)}$ 의 차이에서 기인되는 것으로 스위칭에 의한 손실 보다 스위치 도통 손실로 인한 영향이 크게 나타나는 것으로 사료된다.

표 3 Si 및 SiC를 사용한 컨버터의 효율
Table 3 Efficiencies of Si and SiC converter

| 구분 | Si | | SiC | |
|---------|-------|---------|-------|---------|
| | 효율(%) | 전력손실(W) | 효율(%) | 전력손실(W) |
| 250[W] | 69.31 | 112.87 | 93.93 | 16.44 |
| 500[W] | 79.62 | 127.35 | 96.16 | 20.32 |
| 1000[W] | 95.79 | 45.07 | 97.30 | 28.15 |
| 1500[W] | 95.74 | 67.61 | 98.57 | 22.12 |
| 2000[W] | 98.05 | 41.04 | 98.65 | 27.63 |
| 2500[W] | 98.62 | 34.13 | 98.85 | 28.00 |
| 3000[W] | 98.51 | 46.38 | 97.73 | 69.92 |

5. 결론

본 논문은 고효율 컨버터를 개발하기 위하여 스위칭 소자인 MOSFET를 선택할 때, 실리콘 계열의 MOSFET과 탄화실리콘 계열의 MOSFET중 어느 소자가 더 좋은 효율은 보이는지 컨버터에 적용하여 실험을 실시하였으며, Si 소자는 낮은 전력에서 스위칭 손실이 효율에 큰 영향을 미치지 않지만 높은 전력 영역에서는 낮은 $R_{DS(on)}$ 으로 인해 도통손실이 작음을 확인하였다. SiC소자는 전체 전력영역에서 90%이상의 일정한 효율을 나타내지만, 높은 전력 영역에서는 소자의 높은 $R_{DS(on)}$ 으로 인해 도통손실이 효율에 많이 작용하는 것을 확인하였다.

이 논문은 LS산전의 산학과제 연구비 지원에 의하여 연구되었습

참 고 문 헌

- [1] Jordan, J., "A Comparative Performance Study of a 1200V Si and SiC MOSFET Intrinsic Diode on an Induction Heating Inverter", Power Electronics, IEEE Transaction, Vol. 29, No. 5, pp. 2550-2562, 2013, September.
- [2] 신동현, "SiC MOSFET의 공정기술에 관한 연구", 충북대학교 대학원 석사학위 논문, (2002): 1-17.
- [3] Feng Qi, "Si and SiC power MOSFET characterization and comparison", Transportation Electrification Asia Pacific(ITEC Asia Pacific), 2014 IEEE Conference and Expo, pp. 1-6, 2014, September.