

SiC 소자를 이용한 고주파 스위칭 인버터

신 건, 김태훈, 이우철
한경대학교

High Frequency Switching Inverter Using SiC MOSFET

Geon Shin, Tae-Hun Kim, Woo-Cheol Lee
Hankyong National Univ

ABSTRACT

일반적으로 사용되는 전력 스위치 소자에는 IGBT, MOSFET 등이 있다. 그 중 IGBT 소자는 용량 특성이 우수하여 고 용량 인버터에서 사용가능하다는 장점이 있으나 턴 오프 동작 시 손실 특성과 다이오드 역 회복 특성으로 인해 고속 스위칭 동작에는 부적합하다는 단점이 있다. 최근에는 SiC를 사용한 MOSFET의 개발이 진행되어 MOSFET의 대용량화 및 스위칭 손실저감이 이루어졌고 이에 따라, 본 논문에서는 SiC MOSFET을 이용한 고속 스위칭 인버터를 제안하였으며 그 특성을 기존의 IGBT 소자를 이용한 인버터와 비교분석하고 이를 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

1. 서론

최근 전 세계적으로 몬트리올 협약, 교토의정서 등을 통해 환경문제와 화석연료자원 고갈에 따른 대체에너지 문제가 크게 이슈화되었다. 이에 해결방안 중 한 가지로 현재의 에너지 자원소비의 효율성을 높이는 방안이 제시되었다. 이에 산업, 건설, 수송, 기기 등 여러 분야에 걸쳐 전력 손실을 최소화하는 것이 주된 목표가 되었다. 정부차원에서도 에코 마일리지와 같은 정책을 실행하며 에너지 소비효율을 높이는 것을 장려하고 있다.

일반적으로 사용되는 전력용 스위치 소자로는 실리콘 기반의 바이폴라 트랜지스터, 사이리스터, MOSFET 그리고 바이폴라 트랜지스터와 MOSFET의 장점을 결합하여 용량특성이 우수하고 높은 전류 밀도화가 가능한 고 전력용 스위치 소자인 IGBT 소자가 있다. 전력전자분야에서는 이러한 기존의 전력용 스위치 소자의 효율을 높이기 위한 연구개발을 진행하였다. 이에 기존 실리콘 보다 우수한 물성 특성을 갖는 SiC (탄화규소)를 이용하여 높은 효율을 갖는 전력용 스위치 소자를 개발하였다.

최근 개발된 SiC MOSFET 은 2 배 큰 밴드 갭이 넓은 스위칭 소자로, 전력 변환 시 10 배 높은 절연 파괴 전압과 우수한 열 방출 특성과 전자 포화속도를 가지고 있기 때문에 고속 스위칭 시 발생하는 손실을 줄이고 고 내압, 대 전류를 사용하는 시스템과 열이 많이 발생하는 환경에서도 적합하게 사용할 수 있다. 또한, 열 방출 특성이 우수하기 때문에 냉각에 필요한 기기의 부피 및 칩 소자의 크기를 크게 줄여 전체적인 비용의 저감효과를 얻을 수 있다^[1].

본 논문에서는 이러한 SiC MOSFET 소자의 특성을 분석할 수 있도록 시뮬레이션을 진행하였다.

2. SiC MOSFET 소자를 이용한 고주파 스위칭

2.1 주파수에 따른 인버터의 특성

일반적으로 인버터는 직류 전력을 교류 전력으로 변환하는 전력 변환 장치로 오늘날 DC-DC 컨버터와 더불어 산업체나 가정에서 가장 많이 사용되는 전력변환기이다. PWM 인버터의 경우 교류 전압의 크기와 주파수를 임의로 제어 할 수 있어 모터 드라이브, 무 정전 전원공급 장치(UPS) 등 매우 광범위한 분야에서 사용되어지고 있다.

인버터를 고주파로 스위칭 하여 구동시킬 때는 고조파 감소에 의한 파형 개선과 필터 및 기기의 소형화, 경량화를 할 수 있지만 이에 반해 스위칭 주파수가 높아질수록 손실은 증가한다. 이러한 손실은 주로 소자의 발열 및 구동용량 감소, 신뢰성 저하, 소자의 수명단축 등의 문제점으로 발생한다.

따라서 열 방출 및 손실을 얼마나 감소시키는지와 스위칭 소자의 수명과 가격, 냉각기의 부피 등을 결정짓는 주요요소로 작용한다.

2.2 IGBT와 SiC MOSFET의 손실 특성

일반적으로 소자의 발열과 파괴를 야기할 수 있는 전력손실은 전력용 스위칭 소자의 온, 오프 동작 시 스위치 양단 전압과 전류가 겹치는 구간에서 발생한다. 인버터 시스템에 주로 사용되는 IGBT, MOSFET 등 전력용 스위칭 소자의 특성에 따라 이러한 전력손실패턴이 달라진다.

먼저 IGBT 의 경우 컬렉터로 흐르던 전류가 게이트 전압이 없는 구간동안에도 천천히 줄어드는 잔류전류 (Current tailing) 현상 때문에 턴 오프 손실이 크다는 특성을 갖고, MOSFET 의 경우 스위칭 손실의 주요한 부분을 차지하는 환류 다이오드의 역 회복 (Reverse Recovery Time) 시간이 긴 특성 때문에 큰 턴 온 손실을 가지게 된다. 또한 각 소자의 내전압을 크게 하면 온 저항이 커져 소자의 발열량이 증가하는 문제가 있다.

이러한 손실 특성은 실리콘 기반의 소자에서 발생하는데 이를 줄이기 위해 절연파괴 강도와 열전도도가 우수하여 도통손실의 주요 원인인 온 저항을 작게 만들 수 있는 SiC MOSFET 을 사용할 수 있다. 온 저항이 작으면 실리콘 기반의 스위칭 소자에 비해 소자의 크기를 크게 줄일 수 있을 뿐만 아니라 전류를 차단하는 스위칭 속도를 향상시킬 수 있어 전체적인 시스템의 고 효율화를 이룰 수 있다.

수식 (1)~(4)는 SiC MOSFET의 주파수에 따른 스위칭 손실 및 스위치의 도통손실 그리고 다이오드 특성에 따른 역 회복 손실 및 다이오드의 도통손실 등에 의한 손실을 계산하는 수식

이다. SiC MOSFET 소자는 온 저항 ($R_{DS(ON)}$) 값이 작고 한 주기 당 발생하는 에너지 손실량 (E_{on}, E_{off}) 이 작기 때문에 MOSFET 의 트랜지스터 도통 및 스위칭 손실이 적게 발생하며, 역 회복 시간 (t_{rr}) 이 짧기 때문에 다이오드의 도통 및 스위칭 손실 역시 적게 발생한다. 또한, 각 손실은 주파수에 비례하여 커진다는 것을 알 수 있다. SiC MOSFET에서는 주파수가 높아도 손실이 적기 때문에 보다 높은 효율을 기대할 수 있다.

$$P_{cond(diode)} = V_F * I_F \quad (1)$$

$$P_{sw(diode)} = E_{rr} * f * V_R / V_r(data) = (1/8) * t_{rr} * I_{rr} * V_r * f \quad (2)$$

$$P_{cond(FET)} = I_d^2 * R_{DS(ON)} \quad (3)$$

$$P_{sw(FET)} = (E_{on} + E_{off}) * f \quad (4)$$

3. 시뮬레이션

3.1 각 소자에 따른 인버터 파형 비교

본 논문에서는 시뮬레이션 툴인 PSIM 을 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 1과 같은 인버터 회로를 구성하였고 시뮬레이션은 IGBT 와 SiC MOSFET 소자의 데이터 시트상의 정보를 PSIM 의 Thermal module 기능으로 모델링하고 IGBT 10kHz 와 SiC MOSFET 100kHz 의 스위칭 주파수 사용 시 출력 파형의 변화 및 와트미터를 통한 입출력 효율을 파악할 수 있도록 진행하였다^[2].

시뮬레이션 파라미터 값 V_{in} 는 입력전압 350 [V], V_o 는 정류기 부하에 전달되는 출력전압 220 [Vac], L_o 는 출력 전류, I_{load} 는 부하전류로 V_{w_in} , V_{w_out} 은 입출력 전력파라미터로 설정하였고 Closed loop 에서의 파형을 확인해보았다

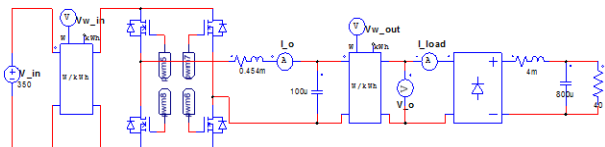


그림 1 인버터 회로도
Fig. 1 Inverter Circuit diagram

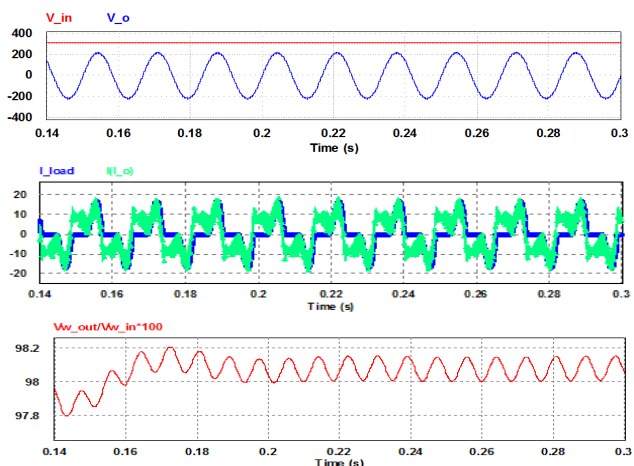


그림 2 IGBT 를 적용한 인버터 시뮬레이션 파형 (F_s : 10 kHz)
Fig. 2 Simulation result for Inverter using IGBT

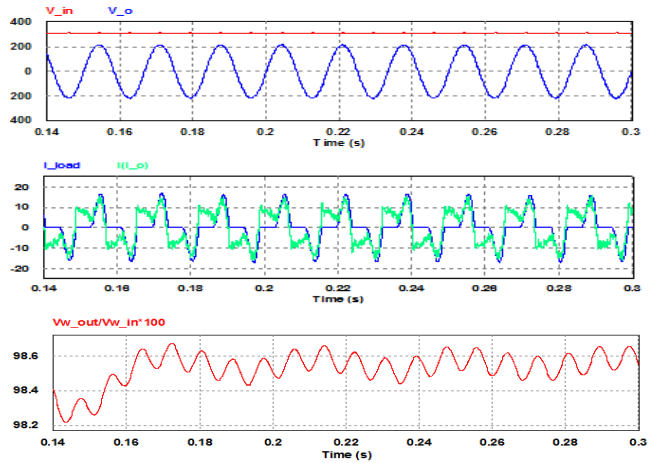


그림 3 SiC MOSFET 을 적용한 인버터 시뮬레이션 파형 (F_s : 100 kHz)
Fig. 3 Simulation result for Inverter using SiC MOSFET

그림 2와 그림 3은 각각 IGBT 10kHz 와 SiC MOSFET 100kHz 로 동작시켰을 때의 시뮬레이션 파형이다. 각 파형의 60Hz 에서의 전고조파왜율 (THD) 을 분석해보면 출력 전압 V_o 의 THD 는 1.6 % 에서 1.5 % 로 줄어들었고, 필터에 흐르는 전류 L_o 의 THD 또한 74 % 에서 67 % 로 감소하여 SiC MOSFET 소자를 100kHz 스위칭한 인버터에서 전류 리플이 줄어들었다는 것을 확인하였다.

10kHz 스위칭 주파수 IGBT 인버터 회로의 효율은 약 98.1 % 정도이고, 100kHz 스위칭 주파수 SiC MOSFET 인버터 회로의 효율은 약 98.6 % 정도로 IGBT 에 비하여 약 0.5 % 정도 높다. 이것으로 IGBT 인버터 회로의 스위치에 의한 손실이 SiC MOSFET 인버터 회로의 손실보다 크다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 SiC MOSFET 스위칭 소자를 통해 고속 스위칭 구동을 할 경우 기존 실리콘 기반의 IGBT 소자보다 고효율화가 가능하다는 것을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 각각 IGBT와 SiC MOSFET 스위칭 소자를 적용한 인버터 시스템을 스위칭 주파수 10 kHz와 100 kHz 로 구동시킬 때 파형을 비교분석하였다. 시뮬레이션을 통해 SiC MOSFET을 적용한 인버터 시스템의 고속 스위칭 동작 시, 파형이 개선되는 것과 스위칭 손실을 줄일 수 있다는 것을 확인하였다. 이에 따라서 SiC MOSFET 소자가 고속 스위칭 시 기존 실리콘 기반의 IGBT 소자에 비해 효율 측면에서 우수한 특성을 갖는 것을 확인하였으며, 앞으로 다양한 응용분야에 적합하게 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

연구는 경기도의 경기도지역협력연구센터(GRRC) 사업의 일환으로 수행하였음.
[[GRRC환경2011-B04], 물류 자동화 시스템의 에너지 절약을 위한 전력변환 기술개발]

참고 문헌

- [1] 강인호, "SiC 전력반도체 소자기술 동향", 세라미스트 16(4), 한국 세라믹학회, 2013.7
- [2] 강태환, "PSIM을 이용한 전력 반도체 소자의 개선된 손실 추정", 추계 전력전자학회, 2008.