

데드 타임 영향에 따른 SiC 기반의 3상 인버터 성능 분석

이태진, 한수혁, 송복근
인피니언 테크놀로지스 코리아

Performance analysis on SiC-based 3-phase inverter by dead-time effect.

Tae Jin Lee, Soo Hyuk Han, Bok Keun Song
Infineon Technologies Korea Co.,LLC.

ABSTRACT

본 논문에서는 Infineon Technologies 1200V 3상 CoolSiC™ 인버터 IPM을 이용하여 데드타임에 따른 전력 손실 및 열 성능을 비교 분석한다. 데드타임은 한 상의 레그에서 두 개의 스위치가 모두 꺼져 있는 구간을 의미하며, 이때 전류의 방향에 따라 상단 다이오드 또는 하단 다이오드로 전류가 흐르게 된다. 그러나 Si MOSFET과 다르게 SiC MOSFET은 높은 에너지 밴드 갭으로 인해 바디 다이오드는 높은 턴 온 전압이 요구된다. 이에 따라 데드타임이 고려되면 바디 다이오드의 도통 손실로 인해 전체 전력 손실이 증가하며 접합 온도도 상승하게 된다. 이를 검증하기 위해 시뮬레이션과 실험을 통해 확인하였다.

1. 서 론

전 세계적으로 에너지 규제 및 전기차 보급화에 따라 전력용 반도체의 중요성이 한층 더 높아지고 있다. 이에 따라 SiC와 GaN 기반의 MOSFET과 다이오드와 같은 전력용 반도체가 많이 상용화가 되고 있으며, 고 효율, 고 전력화에 한 걸음 더 나아가고 있다. 이 물질들은 높은 에너지 밴드 갭을 가지고 있기 때문에 Si 소자보다 훨씬 높은 내압 설계와 고온 동작이 가능하며, 또한 드리프트 영역을 Si보다 얇은 층으로 설계가 가능함에 따라 도통 저항을 줄일 수 있는 큰 장점을 가지고 있다. 그러나 MOSFET에 존재하는 바디 다이오드는 높은 에너지 밴드갭으로 인해 높은 턴 온 전압이 요구되며, 이는 전체 전력 손실을 증가시키는 요인이 된다.

데드타임은 암단락을 방지하기 위해 한 상의 레그에서 상단과 하단 게이트를 모두 턴-오프 시키는 구간을 의미한다. 이 구간 동안 상-하단의 MOSFET은 오프상태이며, 출력 전류의 방향에 따라 상단 또는 하단의 바디 다이오드로 전류가 도통하게 되고 다이오드 전압 강하의 비선형성으로 인해 인버터 출력전압을 왜곡시켜 고조파 왜율을 증가시킨다.^[1] 또한 바디 다이오드의 높은 턴 온 전압으로 인해 추가적인 전력 손실을 발생시켜 접합 온도를 상승시킨다.

본 논문에서는 3상 SiC 인버터에서의 데드타임의 영향을 분석하며, Infineon Technologies 1200V 3상 CoolSiC™ 인버터 Intelligent Power Module (IPM)을 이용하여 전력 손실 및 접합 온도에 대해서 실험 및 시뮬레이션을 통해서 확인한다.

2. 본 론

2.1 데드타임

그림 1은 3상 SiC MOSFET IPM의 한 상의 레그 그림이다. 데드타임 구간 동안에 극성에 따라 전류 i_{as} 의 방향을 나타내고 있다.

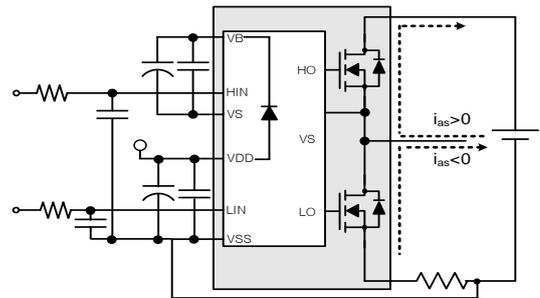


그림1 3상 SiC 인버터 IPM의 한 상의 레그 구성.
Fig.1 Configuration of one phase leg of the 3phase SiC inverter IPM.

그림 2는 데드타임을 고려한 게이트 입력 신호 및 출력 전압에 대한 그림이다. S_a 와 \bar{S}_a 는 각각 상단과 하단 게이트 입력 신호를 의미하고, V_{an} 은 출력전압을 의미한다. \bar{S}_a 턴-오프 후의 데드타임 구간 동안 전류가 양의 방향일 때는 하단의 바디 다이오드로 전류가 도통하여 V_{an} 이(-) 극성을 보이고, 반대로 전류가 음의 방향일 때는 상단의 바디 다이오드로 전류가 도통하여 V_{an} 이(+) 극성을 보이게 된다. S_a 의 턴-오프 경우는 반대로 동작한다.

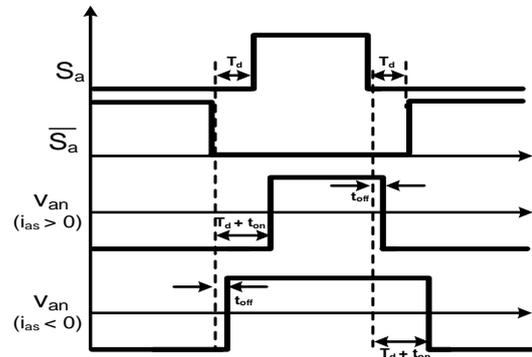


그림2 입력 신호 패턴과 출력 전압
Fig.2 Input signal pattern and output voltage.

그림 2로부터 출력전압을 표현하면 식 (1), (2)와 같이 나타낼

수 있다.

$$\Delta V = \frac{-T_d - t_{on} + t_{off}}{2T_s} V_{DC}, \quad i_{as} > 0 \quad (1)$$

$$\Delta V = \frac{T_d + t_{on} - t_{off}}{2T_s} V_{DC}, \quad i_{as} < 0 \quad (2)$$

위 수식을 이용하여 평균 출력전압을 표현할 수 있으며, 이를 푸리에 급수로 나타내면 기본과 성분에 5, 7, 9차 고조파 성분이 포함되는 것을 확인할 수 있다.^[2] 이는 전류의 왜율 증가를 의미한다.

2.2 1200V CoolSiC™ IPM 특성

그림 3은 1200V CoolSiC™ IPM의 V_{SD} 의 도통 특성을 나타낸다.

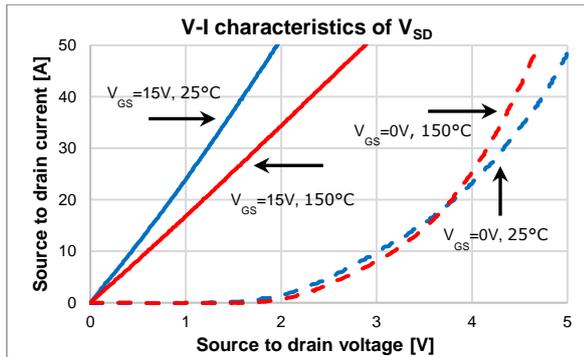


그림3 1200V CoolSiC™ IPM의 V_{SD} 도통 특성
Fig.3 V_{SD} characteristic of 1200V CoolSiC™ IPM.

실선의 그래프는 게이트 전압이 인가된 경우이며, 점선의 그래프는 게이트 전압이 인가되지 않은 경우이다. 점선은 대부분의 전자가 바디 다이오드로 이동하는 걸 의미하며, 턴 온 전압이 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 데드타임 구간에서 큰 전력 손실을 야기한다는 것을 의미한다.

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

표 1은 동작 조건이며, 이를 바탕으로 시뮬레이션 및 실험을 통해 전력 손실 증가 및 접합 온도 상승을 검증하였다.

표 1 시뮬레이션 및 실험 동작 조건

Table 1 Operation condition for simulation and experiment.

VDC	600 [V]	Output current	20 [A _{pk}]
Switching frequency	20 [kHz]	MI / PF	0.51 / 0.92
Output frequency	60 [Hz]	PWM	SVPWM

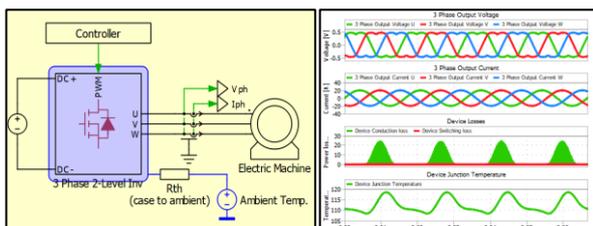


그림4. 열 성능 및 전력 손실 검증을 위한 PLECS 시뮬레이션 모델링
Fig.4 PLECS modeling for thermal performance and loss verification.

시뮬레이션은 그림 4와 같이 전력용 반도체의 전력 손실 및 접합 온도 확인을 위해 PLECS로 모델링 하여 검증하였으며, 실험의 경우 열화상 카메라를 이용하여 실제 접합 온도를 측정하여 검증하였다.

그림 5는 시뮬레이션 및 실험 결과에 따른 데이터를 보여준다. 데드타임이 길어짐에 따라 전력 손실의 증가 및 접합 온도가 상승함을 확인할 수 있으며, 이는 바디 다이오드로 도통하는 시간이 늘어남에 따라 손실이 커진다는 것을 알 수 있다. 또한 스위칭 주파수가 증가하게 되면 데드타임의 주기가 짧아져서 손실 및 접합 온도가 증가됨을 예상할 수 있다.

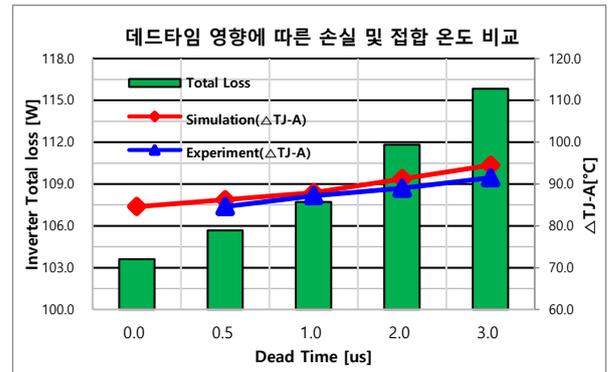


그림5. 데드타임 영향에 따른 시뮬레이션 및 실험 결과
Fig.5 Simulation and experiment result according to the dead time effect.

4. 결론

본 논문에서는 데드타임 영향에 의한 SiC MOSFET 인버터의 성능을 분석하였으며, 1200V 3상 CoolSiC™ 인버터 IPM을 이용하여 실험과 시뮬레이션을 진행하였다. 데드타임 구간이 길어짐에 따라 전력 손실과 접합 온도가 증가함을 확인하였고, 이는 바디 다이오드에 도통 구간이 늘어남에 따라 손실이 증가함을 의미한다.

또한 스위칭 주파수에 따라 데드타임의 주기가 결정되고 출력 전류의 크기에 따라서도 바디 다이오드의 손실이 결정되기 때문에 시스템 설계 시 적절한 시뮬레이션 모델링 및 실험을 통한 검증이 필요하다.

참고 문헌

- [1] J. W. Choi and S. K. Seol, "Inverter output voltage synthesis using novel dead time compensation." IEEE Trans. Power Electron, vol. 11, no.2. pp. 221-227, 1996, March.
- [2] Dead Time Compensation Method for Voltage-Fed PWM Inverter: IEEE Transaction on energy conversion, Vol. 25, No. 1, 2010, March.
- [3] Dead Time Compensation of Grid-connected Inverter Using Resonant Controller: KIPE, pp. 569-576, 2011, Oct.
- [4] AN2020-41 CIPOST™ Maxi IPM IM828 Series Application Note, Infineon Technologies.
- [5] New 1200 V SiC MOSFET Intelligent Power Module: PCIM Europe: International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, pp. 874-878, 2019, May.