

전력반도체 열모델 개발을 위한 임의 전류 발생기 설계 및 열-온도 데이터 측정

정현호^[1], 최승우^[1], 유지원^[1], 임동현^[2]

[1] 인하대학교 전기·컴퓨터공학과, [2] 밀림씨스콘

Design of AC-Loss-Generating Buck Converter and Loss-Temperature Data Measurement for Thermal Model Development of Power Semiconductor

Hyeonho Jeong^[1], Seung-Woo Choi^[1], Jiwon Yoo^[1], Dong-Hyun Lim^[2]

[1] Dept. of Electrical and Computer Engineering, Inha University, [2] Milim Syscon Co., LTD

ABSTRACT

본 연구에서는 IGBT 전력반도체의 열모델 특성 측정을 위해 손실을 인가하는 buck 컨버터 기반의 대전류원의 설계를 제안한다. 임의의 손실 인가를 구현하기 위해 실험을 통해 얻은 소자의 전류-손실 참조표와 단상 buck 컨버터 회로의 부하단 전류 제어를 통해 소자에 정확한 손실을 인가하도록 하였다. 설계된 전류원을 활용하여 손실 인가에 따른 IGBT 전력반도체의 각 포인트별 온도를 측정하였고, 이를 통해 IGBT 전력반도체의 열적 특성을 분석하고, 열모델을 개발하기 위한 기초 데이터를 확보하였다.

1. 서론

전력반도체는 에너지 변환 시스템의 핵심요소로, 소자의 성능과 신뢰성은 열에 크게 의존하며 직접적인 영향을 받는다^[1]. 이러한 전력반도체의 열 특성을 예측하는 열모델을 개발하는 연구는 많이 진행되어왔으나^[2], 이는 소자의 각 층의 재료의 열저항과 열용량의 측정과 데이터시트를 기반으로 하는 열모델 개발 연구가 대부분이었다. 이는 정확하지만 재료의 파라미터를 구하는 것은 매우 어려운 일이다.

이에 대한 대안으로 측정 데이터 기반으로 열모델을 추정하는 연구가 진행되고 있다^[3]. 계단 함수 혹은 정현파 형태의 열입력에 대해 온도를 측정함으로써 전력반도체의 열전달 임피던스 특성을 파악할 수 있다. 이러한 방법을 활용하면 별도의 설계 도면 없이 열모델을 파악할 수 있지만, 실제 열 입력 및 온도 측정에서 발생하는 실험 오차가 열모델의 정확도를 떨어뜨릴 수 있다.

본 연구에서는 전력반도체 소자에 다양한 주파수의 정현파 도통 손실을 정확하게 인가하기 위한 buck 컨버터 기반 전류 제어기를 설계한다. 열전달 임피던스를 측정하고자 하는 주파수 영역에서 전류 오차를 줄일 수 있는 필터 설계를 제안하고, 정확한 정현파 도통 손실 인가를 위한 손실-전류 참조표 기반의 도통 손실 주입 제어기를 제안한다. 제안하는 도통 손실 발생기를 통해 얻은 주파수별 온도 데이터를 이용하여 열전달 임피던스 특성 추출이 가능함을 실험적으로 검증한다.



그림 1. 실험세트 블록 다이어그램

Fig 1. Test bed block diagram

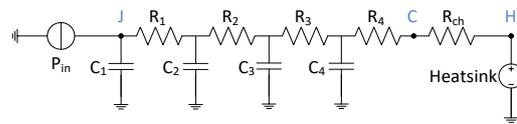


그림 2. 전력반도체의 열저항-열용량 네트워크

Fig 2. Thermal resistor-thermal capacity semiconductor

2. buck 컨버터 기반 도통 손실 발생기 설계

전력반도체의 열모델을 추정하기 위해서는 전력반도체에 실제 손실을 발생시키고, 이에 따른 전력반도체의 각 부위의 온도를 측정해야 한다. 본 논문에서는 그림 1과 같이 buck 컨버터로 대상 전력반도체 모듈에 전류를 인가하여 다양한 주파수의 도통 손실을 발생시킨다. 이때 전력반도체 소자와 방열판의 온도 데이터를 DAQ 장비로 측정하여 열모델 추정을 위한 원데이터(Raw data)로 활용한다. 열-온도 데이터의 정밀한 측정을 위해서는 정확한 주파수와 위상의 도통 손실 인가가 필수적이다. 이를 위해, 전력반도체에서 도통 시 발생하는 열을 정밀하게 제어하기 위한 buck 컨버터의 전류 대역폭, 필터 제정수를 설계해야 한다.

2.1 도통 손실 제어를 위한 전류 제어기 대역폭 설계

본 연구에서는 대상 전력반도체로 62mm IGBT module인 Hitachi Energy 社の 5SNG-0150Q170300을 사용하였다. 대상 모듈(Device under test, DUT)의 정격 전압은 1700 V이며, 정격 전류는 150 A이다. 전력반도체의 열은 Junction에서 발생하며, 그림 2의 열저항-열용량 네트워크를 통해 방열판으로 열이 전달되며 각 층의 온도가 결정된다. 이 과정에서 높은 주파수의 열 성분은 전력반도체의 열용량으로 인해 필터링 되어 온도에 영향을 미치지 않는다.

본 연구에서는 손실이 실질적으로 온도에 유의미한 영향을 미치는 10 Hz 미만의 주파수에 대해서 열-온도 데이터를 측정한다. 따라서, 제안하는 교류 손실 발생기의 buck 컨버터는 10 Hz 이하 주파수에 대해서 정확한 위상과 크기로 전류를

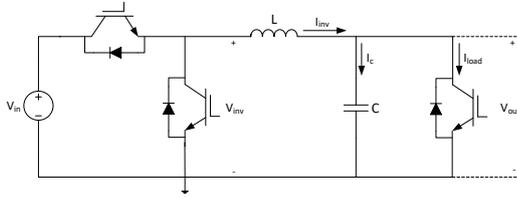


그림 3. IGBT를 연결한 컨버터 회로
Fig 3. Connecting IGBT buck converter circuit

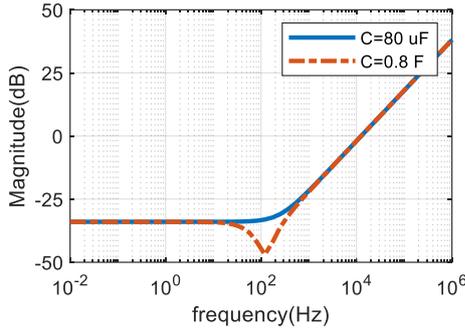


그림 4. RLC 부하 임피던스 보데 선도
Fig 4. RLC load impedance Bode plot

제어해야 한다.

대역폭 ω_{cc} 를 가지는 전류제어기에 대해 전류 지령 i_s^* 에 대한 출력 전류 i_s 의 전달 함수 $H(s)$ 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H(s) = \frac{i_s}{i_s^*} = \frac{\omega_{cc}}{s + \omega_{cc}} \quad (1)$$

이때, 10 Hz에 대한 $H(s)$ 의 크기 및 위상은 다음과 같다.

$$|H(j2\pi 10)| = \frac{\omega_{cc}}{\sqrt{(2\pi 10)^2 + \omega_{cc}^2}} \quad (2)$$

$$\angle H(j2\pi 10) = -\tan^{-1}\left(\frac{2\pi 10}{\omega_{cc}}\right) \quad (3)$$

한편, ω_{cc} 는 안정적인 전류제어를 위해 벽컨버터의 샘플링 주파수의 1/10 이하로 설정되어야 한다. 이러한 조건을 고려하였을 때, $\omega_{cc} = 200$ Hz로 설정하였으며, 이때 $|H(j2\pi 10)| \approx 0.998$ 이며, $\angle H(j2\pi 10) \approx -2.9^\circ$ 이다.

2.2 도통 손실 발생기의 필터 설계

필터를 설계하기 위하여 회로의 파라미터를 선정하는 데에 있어 고려해줘야 하는 사항이 있다. 첫번째는 부하 전류의 고조파 감쇠이다. 벽컨버터는 스위칭 소자를 이용한 전력변환장치로 출력전류는 스위칭 주파수와 그 이상의 주파수를 가진 고조파를 포함하게 되므로, 이를 제거한 정확한 정현파 전류가 DUT에 인가되도록 파라미터를 선정해야 한다.

그림 3의 회로에서 인덕터와 커패시터는 마치 부하 단에 LC필터를 삽입한 것과 같은 역할을 한다. LC 필터에 대해 회로의 입력 전압에 대한 출력 전류의 전달함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{I_{load}}{V_{inv}} = \frac{1}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}} \quad (4)$$

이때, 전달 함수의 절점 주파수는 스위칭 주파수의 최소 1/10배 보다 작게 설정하여 부하의 전류에서 스위칭 주파수 성분과 고조파 성분이 충분히 감쇠되도록 해야한다. 본 연구에서 스위칭용 IGBT의 스위칭 주파수는 20 kHz이므로 LC

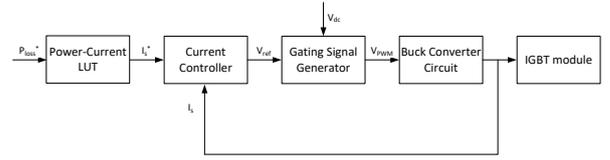


그림 5. IGBT 전류제어 시스템
Fig 5. IGBT current control system

R _{load}	20	[Ω]
L	80	[μH]
C	80	[μF]

표 1. 벽컨버터 회로 파라미터

Table 1. Buck converter circuit parameter

필터의 절점 주파수는 식(4)로부터 다음 식을 만족해야 한다.

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \leq 2\text{kHz} \quad (5)$$

따라서, $LC \geq 6.33 \times 10^{-9}$ 를 만족하는 인덕턴스와 커패시턴스를 선정해야 한다.

두번째 고려사항은 부하의 임피던스 특성이다. 본 연구에서 제안하는 벽컨버터는 PI 제어기를 사용하여 전류제어를 수행한다. 이때, 기존의 극-영점 상쇄 기법(Pole-Zero Cancellation)을 통해 전류제어를 수행하기 위해서는 벽컨버터의 스위치에서 바라본 출력 임피던스 특성이 RL부하의 특성을 지녀야한다.

따라서, 다음과 같이 커패시턴스를 적절히 조절하여 부하의 임피던스를 다음과 같이 RL 부하의 형태로 모델링해야 한다.

$$Z(s) = sL + \frac{R}{sRC+1} \approx sL + R \quad (6)$$

그림 4의 실선은 커패시턴스 값을 크게 선정했을 때의 V_{inv} 에서 바라본 입력 임피던스 보데 선도이다. 반면, 임피던스 특성을 고려하여 커패시턴스 값을 설정하였을 때는 그림 4의 점선과 같이 RL부하와 비슷한 임피던스 특성을 보이는 것을 확인할 수 있다.

마지막으로 부하단에 연결되어 있는 IGBT에 실제 흐르는 전류를 고려하여 커패시턴스를 선정해야 한다. 스위치의 PWM을 통하여 제어할 수 있는 전류는 그림 3의 I_{inv} 뿐이다. 따라서 소자에 인가할 도통 손실의 최대 주파수인 10Hz에서 식(7)을 만족하도록 부하단 저항에 비해 커패시턴스를 매우 작게 선정하여 I_c 를 무시할 정도 작게 만들어주어야 한다.

$$\frac{1}{sC} \gg R_{load} \quad (7)$$

위 사항들과 IGBT 전력반도체의 데이터시트를 고려하여 설계한 결과 최종적으로 선정된 회로의 파라미터 값은 표 1과 같다.

2.3 참조표 기반 임의 도통 손실 제어기 설계

그림 5는 DUT에 흐르는 전류를 제어하기 위한 도통 손실 제어기 시스템을 나타낸 블록 다이어그램이다. 도통 손실 지령 P_{loss}^* 가 입력되어, 손실-전류 참조표를 통해 P_{loss}^* 를 달성할 수 있는 전류 지령 I_s^* 가 계산된다. 출력전류 I_s 는 전류제어기와 게이트 구동회로를 통해 I_s^* 로 제어된다.

손실-전류 참조표를 구성하기 위해 소자에 0 A부터 100 A까지 1 A씩 증가하는 전류를 인가하여 그에 따른 전압 데이터를 추출하였다. 그림 6 (a)은 오실로스코프를

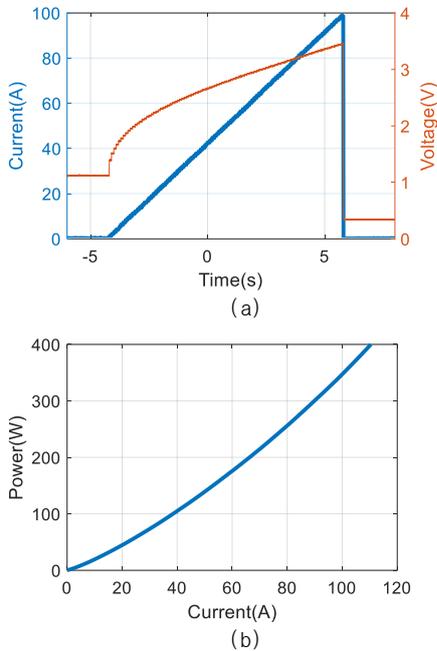


그림 6. (a) 전류에 따른 전압 데이터 (b) 전류에 따른 손실 데이터
 Fig 6. (a) Voltage according to current (b) Power loss according to current

이용하여 측정된 전류와 전압 데이터이다. 추출한 데이터들의 각 전류에서의 전압을 곱하여 소자에 인가되는 손실을 구하였을 때, 실험의 최대 전류인 100 A에서 약 350 W의 손실이 발생하였고, 보다 넓은 범위의 손실 인가를 위하여 외삽법을 이용해 그림 6 (b)와 같이 최대 400 W의 손실을 인가할 수 있는 전류-손실 참조표를 구성하였다.

3. 실험 검증

3.1 실험 조건

본 연구의 목적은 62mm IGBT module의 열모델을 개발하는 것이다. 따라서 IGBT의 주요 포인트에 온도센서를 부착하였고 DAQ 장비를 사용하여 각 층의 온도 데이터를 수집하였다. 이때 인가하는 지령 손실은 식(8)의 정현파를 지령 손실 값으로 하였다.

$$P_{in} = 180 \sin(2\pi ft) + 180. \quad (8)$$

3.2 실험 결과

실험은 식(8)에서 0.1 Hz의 주파수를 갖는 손실을 DUT에 인가하여 진행하였다. 손실에 따른 온도 그래프는 그림 7 (a)와 같다. IGBT module의 Diode에 전류를 인가하여 이때의 온도를 측정하였다. 파란 그래프는 Diode, 빨간 그래프는 Copper plate, 노란 그래프는 Case 온도이다. 손실 그래프와 약간의 위상차가 존재하지만 일정한 주기로 그래프가 반복되는 것을 확인하였다. 그림 7(b)는 다양한 주파수 영역에서의 온도 데이터를 수집하여, 열모델을 구하기 위해 각 주파수에서의 임피던스의 크기와 위상을 주파수

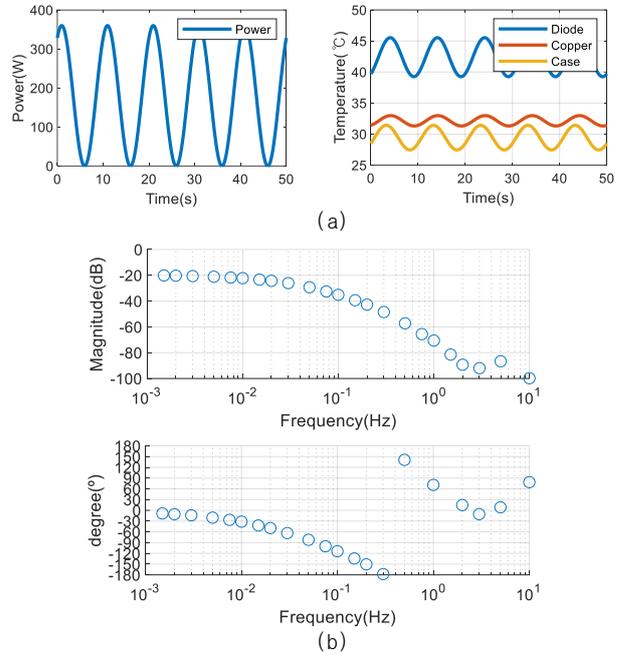


그림 7. (a) 시간에 따른 포인트 별 손실 및 온도 그래프 (b) 주파수 영역에서 열모델 임피던스 크기-위상 곡선
 Fig 7. (a) Power and temperature graph according to time (b) Thermal impedance Bode plot in frequency domain

영역에서 plot한 것이다. 그림 7(b)를 이용하여 전달함수를 구하고 열모델을 도출할 것이다.

4. 결론

본 논문에서는 IGBT 전력반도체의 열모델 개발을 위한 벡컨버터 기반 임의 손실발생기 설계 기법과 도통 손실 제어를 통한 열전달 임피던스 측정 방법을 제안하였다. 또한 제안된 손실 제어법을 이용하여 실제 소자에 다양한 주파수의 전류를 흘렸을 때의 온도 데이터를 수집하는데 성공하였다.

향후 전력반도체의 열모델 특성을 측정하고 개발하는데 있어서 추출한 온도 데이터들을 활용할 것이며, 전력반도체의 온도를 안정적으로 관리하며 신뢰성과 수명을 크게 개선시킬 수 있을 것이라 생각된다.

참고 문헌

- [1] H. Shen, J. Zhang, P. Sun, and X. Ma, "Review on the Thermal Parameters Applications in the Reliability of Power Semiconductor Device," *2024 IEEE 7th International Electrical and Energy Conference*, pp. 4482-4487, July, 2024
- [2] S. Race et al., "Circuit-Based Electrothermal Modeling of SiC Power Modules With Nonlinear Thermal Models," in *IEEE Trans. Power Electron.*, vol.37, no. 7, pp.7965-7976, July 2022
- [3] K. Ma, N. He, M. Liserre, and F. Blaabjerg, "Frequency-domain thermal modeling and characterization of power semiconductor devices," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 10, pp. 7183-7193, Oct. 2016.