

스위치 열해석을 통한 최적 방열판 선정 방안에 관한 연구

강경필, 한 유, 안윤영*, 임용배**, 최규하
 Konkuk University, ETRI*, KESCO**

A Study on Optimal Selection of Heat Sinks Through Thermal Analysis of Switching Devices

Kyoung Pil Kang, Yu Han, Yoon Young An*, Yong Bae Lim**, Gyu Ha Choe
 Konkuk University, ETRI*, KESCO**

ABSTRACT

This paper is studied on optimal selection of heat sink for power electronics devices according to switching conditions. Through thermal analysis of MOSFET and repeated digital simulation, the loss characteristics during both switching and conduction intervals are compared to volume of the heat sinks. As a result, heat sink larger by 25% in volume could radiate more heat about 19°C.

1. 서론

현재 연구소 및 산업계에서 널리 사용되고 있는 MOSFET과 IGBT와 같은 스위칭 소자는 전력변환 과정에서 열을 발생한다. 일반적으로 스위칭 소자에서 발생하는 열은 스위치가 켜짐과 꺼지는 순간에 발생하는 스위칭 손실과 스위치의 내부로 전류가 흐르는 중에 발생하는 도통 손실로 구분된다. 이 손실들은 전력변환장치의 효율과 수명 및 안정성에 큰 영향을 미치는 요소이다. 대부분의 전력변환장치는 각 소자에서 발생하는 열을 완하시켜 안정적인 동작을 도모하기 위한 방열설계를 하고 있다. 전력변환장치에서 방열판은 안정성, 무게, 가격 등을 결정하는 요소로써 저비용·고성능 달성을 위해 방열판의 최적화가 필요하다. 또한 향후 지구온난화로 아열대화의 지속으로 인한 기후환경의 변화와, 프로슈머 설비의 보급에 따른 전기설비환경의 변화로 인해 기존의 방열 설계를 보완하기 위한 방열판을 최적화하는 연구가 필요하다.^[1]

본 연구에서는 대표적인 스위칭 소자인 MOSFET의 동작에 따른 스위치 손실을 고려한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 최적 방열판선정을 가능케 한다.

2. 스위치 동작에 따른 스위치 손실 계산

그림 1은 MOSFET 계열 스위치가 게이트 신호 1주기에 따라 스위치의 드레인 소스전압(V_{DS})과 도통전류(I_D)가 변화하는 모습을 간단히 나타낸 것이다. 게이트 신호가 스위치에 인가되는 시점에서 V_{DS} 와 I_D 는 상승 또는 하강 하게 되고, 스위치가 켜지거나 꺼지는 동작 중에 발생하는 손실을 스위칭 손실(P_{sw})이라 하고 이는 수식 (1)~(2)와 같이 표현된다.

$$P_{sw,on} = \frac{1}{2} \cdot V_D \cdot I_D \cdot t_{on} \quad (1)$$

$$P_{sw,off} = \frac{1}{2} \cdot V_D \cdot I_D \cdot t_{off} \quad (2)$$

$$P_{cond} = I_D^2 \cdot R_{DS,on} \cdot (t_\alpha) \quad (t_\alpha = t - t_{on} - t_{off}) \quad (3)$$

또한 스위치가 켜진 상태에서 발생하는 도통손실(P_{cond})은 스위치 내부저항($R_{DS,on}$)과 도통전류(I_D)로 표현되고, 수식 (3)과 같다. 위의 수식 (1)~(3)을 이용하여 스위치에서 발생하는 전체 손실(E_{loss})은 수식 (4)와 같고, 이는 (5)와 같이 스위칭 신호 1주기 동안의 스위치 손실로 표현된다.^[2]

$$P_{loss} = P_{sw} + P_{cond} \quad (4)$$

$$E_{loss} = \frac{1}{2} \cdot V_D \cdot I_D \cdot (t_{on} + t_{off}) + I_D^2 \cdot R_{DS,on} \cdot (t_\alpha) \quad (5)$$

이로부터 스위치 발열은 수식 (6)과 같이 주어지고, 예상되는 온도상승분은 시간에 대한 함수로 표현되며, 수식 (7)과 같다.

$$W_{SW} = P_{loss} \cdot \Sigma t_k \quad (6)$$

$$T_{rise} = f(P_{loss}, t_k, \alpha) \quad (7)$$

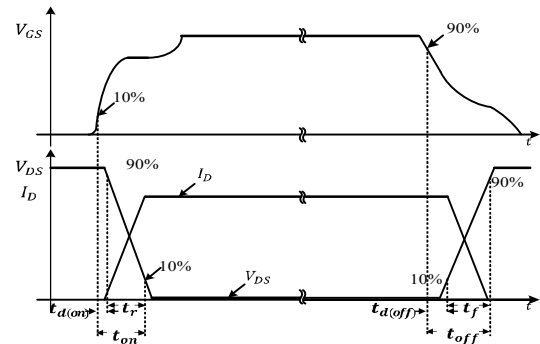


그림 1. 게이트 신호에 따른 스위치 전압 및 도통 전류
 Fig. 1. Timing diagram of V_{DS} , I_D with V_{GS} .

3. 열해석 시뮬레이션

스위치 열 손실 계산 결과를 토대로 시뮬레이션을 진행하기 위해 그림 2와 같이 인터리브드 벅 부스트컨버터를 선정하였고, 컨버터의 동작조건을 $V_{DS}=750[V]$, $I_D=40[A]$, $f_{sw}=20[kHz]$ 라 할 때 각 스위치의 발생 손실(P_{loss})은 약 15[W]이다.

시뮬레이션에 사용된 방열판은 그림 3과 같이 구성재질이

동일하고(Al), 방열판의 높이($h_1=4[\text{cm}]$, $h_2=5[\text{cm}]$)에 차이를 두어 방열판 체적이 25%($Q_1=576[\text{cm}^3]$, $Q_2=270[\text{cm}^3]$) 차이가 나도록 하였다. 또한 썬넬 컴파운드(thermal compound)와 산화알루미늄 접착제를 사용하여 스위치와 방열판 사이의 충분한 방열이 일어나도록 스위치를 배치하였다. 그리고 외기온도와 방열판 초기 온도는 22℃, 외부 냉각장치 없이 자연냉각 방식으로 방열이 되도록 시뮬레이션 조건을 설정하였다.

디지털 시뮬레이션은 ANSYS 16.0을 사용하였으며, 각 방열판의 온도변화가 스위치의 일정한 손실(P_{loss})에 의해 동작시간($t_1=60\text{초}$, $t_2=2400\text{초}$)에 따라 변화하는 정도를 비교하였다.

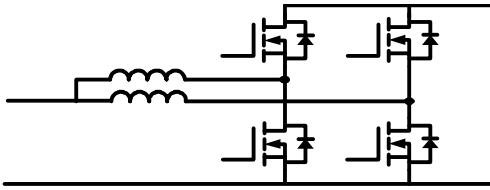


그림 2. 열 시뮬레이션에 사용한 DC-DC 컨버터 토폴로지
Fig. 2. DC-DC converter topology for heat analysis.

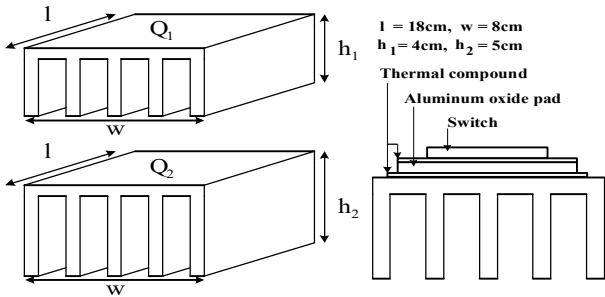


그림 3. 방열판 형상과 스위치 결합 단면도
Fig. 3. Feature of heat sink and view of connected switch.

4. 방열 개선결과

시뮬레이션 조건에 따라 시뮬레이션을 실시하였을 때 방열판 Q_1 과 Q_2 의 온도 변화는 각각 그림 4, 그림 5와 같이 나타났다. 방열판의 열 분포는 스위치와 맞닿아있는 방열패드 부분이 가장 높았으며, 스위치에서 멀어질수록 점차 낮아진다.

4.1 방열판(Q_1)의 열 해석 결과

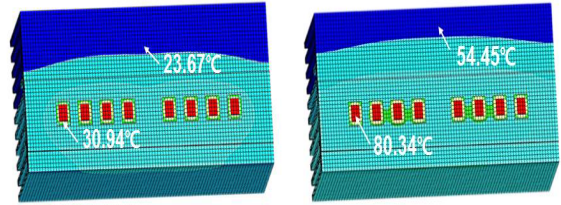
t_1 일 때 방열판의 최저·최고 온도는 각각 23.67℃, 30.94℃이고, t_2 일 때 최저·최고 온도는 54.45℃, 84.34℃이다. 방열판 온도 상승폭은 최저 30.78℃에서 최대 53.40℃까지 상승하였다. 해석 결과 방열판 Q_1 은 자연냉각 방식으로 냉각할 경우 충분한 방열 효과를 얻을 수 없고, 장시간 운전할 경우 스위치 발열로 인한 스위치의 소손이 일어날 것으로 예상된다.

4.2 체적이 증가된 방열판(Q_2)의 열 해석 결과

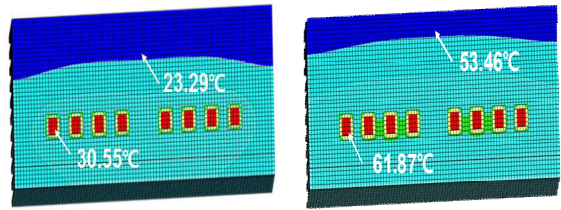
방열판의 체적이 증가한 상태에서 t_1 동안 동작하였을 때 방열판의 최저·최고 온도는 각각 23.29℃, 30.55℃이고, t_2 일 때의 최저·최고 온도는 53.46℃, 61.87℃이다. 방열판 온도 상승폭은 최저 30.17℃에서 최대 31.32℃ 상승하였다.

각 방열판 Q_1 , Q_2 의 해석결과 동작시간이 짧은(t_1) 경우 두

방열판의 온도상승이 약 30℃로 비슷하게 나타나지만, 장시간 동작 시(t_2) 두 방열판의 최고 온도상승 변화가 80℃와 61℃로 약 20℃의 차이를 보인다. 이러한 차이는 방열판 핀 길이(h)의 증가로 인하여 방열판의 표면적이 증가하는 효과로 작용하여 더 많은 방열이 된 것으로 판단된다.



(a) 60 초 (b) 2400 초
그림 4. 초기 방열판에 대한 모의실험 결과
Fig. 4. Simulation result of initial heat sink.



(a) 60 초 (b) 2400 초
그림 5. 체적이 증가된 방열판에 대한 모의실험 결과
Fig. 5. Simulation result of larger bulk heat sink.

5. 결론 및 검토

본 연구는 MOSFET 계열 스위치를 사용한 DC DC 컨버터의 스위치 손실을 계산하고, 반복적인 열 해석 시뮬레이션을 통해 전력변환장치에 최적화된 방열판을 선정하는 방법에 대해 연구하였다. 시뮬레이션 결과 선정된 방열판(Q_1)의 크기보다 25% 증가된 방열판(Q_2)의 경우 시간에 따른 스위치 및 방열판의 온도상승 폭이 적어 안정적인 방열이 이루어짐을 알 수 있었다. 스위치의 열손실 계산과 반복적인 열 해석 시뮬레이션은 전력변환장치의 최적화된 방열판을 선정하는데 있어서 비용절감과 장치의 안정성 확보에 기여할 것으로 기대된다. 추가적으로 전력변환장치를 구성하는 저항, 인덕터, 커패시터 등과 같은 소자에서 발생하는 손실과 전력변환장치를 둘러싸고 있는 외함으로 인한 공기의 대류현상까지 고려하는 연구가 필요하다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No.20162220200010)

참고 문헌

[1] Alexander Anthon, Zhe Zhang, Micheal A. E. Andersen "Comparative evaluation of the loss and thermal performance of advanced three level inverter topologies", APEC 2016 IEEE, 2016, May.
[2] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, "Power Electronics : converters, applications and design" Third Edition, John Wiley & SONS, Inc. pp. 20 24, 730 743, 2003.