

반도체 변압기용 AFE 정류기의 열해석 연구

왕산산, 강경필, 백주원¹, 김주용², 조영훈
 건국대학교 전력전자연구실, 한국전기연구원¹, 한전 전력연구원²

Thermal analysis of the active-front-end rectifier for solid-state-transformer applications

SHANSHAN WANG, Kyoung Pil Kang, Ju Won Baek¹, Juyong Kim², Younghoon Cho
 Power Electronics Lab. Konkuk Univ. KERI¹, KEPRI²

ABSTRACT

This paper is study on thermal analysis of the active front end(AFE) rectifier for solid state transformer(SST) applications. finite element analysis simulation model is combined by switching component model, power diode and heat sink model. thermal model is calculated by computer program and feedback the result. using simulation result analysis switching loss and compare to thermal diffusion of the heat in the model for steady state operation.

1. 서 론

최근 전력용 반도체 소자를 이용한 반도체 변압기(SST, solid state transformer)에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 반도체 변압기는 무겁고 부피가 큰 전통적인 배전용 변압기 대비 크기감소와 고효율을 달성할 수 있는 장점이 있다. 반도체 변압기의 안정적인 운용을 위해서는 시스템의 열해석이 필수적이다. 대부분의 전력변환 장치의 손실은 스위칭 소자의 동작과 수동소자에서 발생하는 손실로 구성 되어있다. 이 중에서도 스위칭 소자에서 발생하는 손실은 방열판 설계와 직결되는 문제이므로 스위칭 동작에 따른 소자의 손실계산과 열해석은 시스템 최적화에 중요한 사안이다.^[1]

본 연구에서는 반도체 변압기를 구성하는 AFE 정류기를 구성하는 스위칭 소자와 다이오드의 손실을 계산하고, 손실을 고려한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 AFE 정류기의 열해석을 수행하였다.

2. 스위치 손실과 다이오드 손실의 계산^{[2],[3]}

그림 1은 전력변환 장치의 대표적인 스위칭 소자인 MOSFET의 1주기 동안 스위치의 드레인 소스전압(V_{DS})과 도통전류(I_D)의 변화를 나타낸 것이다. 그림과 같이 스위치에 게이트 신호(V_{GS})가 인가되면 이에 따라 스위치의 V_{DS} 는 0으로 감소하고, I_D 는 증가한다. 반대로 게이트 신호가 0이되면 스위치의 I_D 는 감소하고 V_{DS} 는 증가한다. 이 때 스위치의 전압과 전류가 증가·감소하는 짧은 시간동안 스위치에서는 손실이 발생하게되고, 이를 스위칭손실(P_{sw})라 한다. 또한 스위치가 켜진

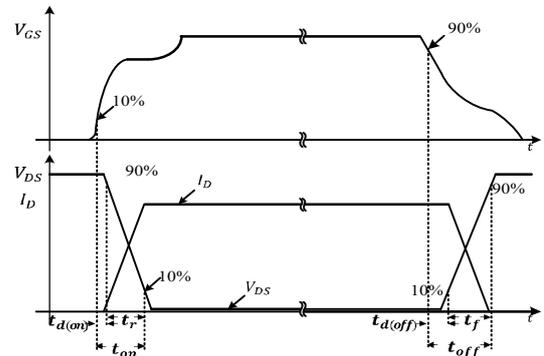


그림 1 게이트 신호에 따른 스위치 전압 및 도통 전류
 Fig. 1 Timing diagram of V_{DS}, I_D with V_{GS} .

상태에서 스위치 내부로 전류가 흐르는 동안 스위치의 내부 저항(R_{DSon})에 의해 발생하는 손실을 도통손실 (P_{cond})라 한다. 스위칭 손실과 도통손실은 식 (1)~(3)과 같이 계산할 수 있으며, 스위치에서 발생하는 전체손실(P_{loss})은 스위칭 손실과 도통손실의 합과 같다. 스위치에서 1주기 동안 발생하는 스위칭 손실은 식(4),(5)으로 표현할 수 있다.

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

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

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

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

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

$$P_d = 0.7 \cdot I_D \cdot (t_\alpha) \quad (6)$$

이상적인 다이오드의 경우 순방향 바이어스 전압이 0이 되어 손실이 없으나, 실제 다이오드의 경우 다이오드 내부의 결합(junction)에 의해 작은 전압이 일정하게 유지된다. 그러므로 도통전류 I_D 에 의해서 다이오드에서 발생하는 손실(P_d)을 계산하면 식 (6) 과 같다.

다음의 그림 2는 본 연구에서 사용한 스위치와 다이오드로 구성된 3 레벨 NPC(neutral point clamped) 구조를 갖는 단상 3 레벨 AFE 정류기 1 모듈의 회로도이다.

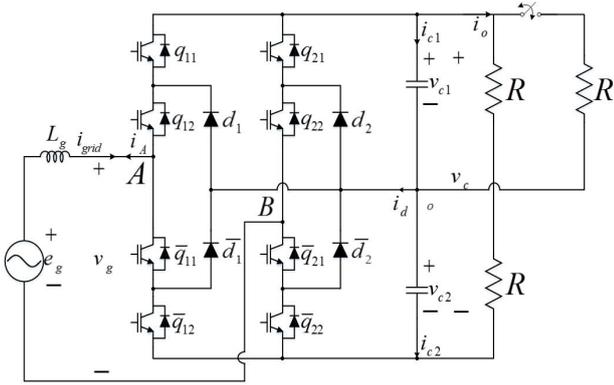


그림 2 단상 3-레벨 AFE 정류기 회로도
Fig. 2 Single-phase three-level AFE rectifier

3. 열해석 모의실험

열 해석 모의실험은 ANSYS 16.0에서 제공하는 정상상태 열해석 툴을 사용하였으며, 모의실험에 필요한 디지털 해석 모델을 그림 3과 같이 제작하였다.

디지털 해석 모델은 방열판 1개, 스위치 8개, 다이오드 4개 및 1장의 PCB로 구성되어 있다. 해석 결과의 원활한 분석을 위해 AFE 정류기가 동작하는 동안 PCB에서 발생하는 손실은 없고, 스위치와 다이오드에서만 손실이 발생한다고 가정하였다. 사용한 방열판의 크기는 (105mm×148.5mm×10mm)이며, 스위치 및 다이오드는 TO 247 패키지를 사용하였다. 또한 스위치에서 발생하는 열이 방열판으로 충분히 전달되고, 절연을 유지할 수 있도록 스위치와 방열판사이에 산화알루미늄 절연패드와 썬벌 컴파운드를 구현하여 실제 실험 환경과 유사하도록 배치하였다.

열 해석을 위한 모델 외부의 환경 조건은 외기온도가 22℃인 넓은 공간에서 외부 냉각장치 없이 자연냉각으로 방열이 일어나도록 설정하였다. 모델 내부 환경조건은 앞서 언급한 수식 (5),(6)을 이용하여 계산하였고, AFE 정류기의 스위치 손실과 다이오드 손실은 약 7.5[W], 6[W]이다. AFE 정류기의 내·외부 환경 조건에서 스위치 및 다이오드의 손실에 의한 모델의 열분포를 확인하였다.

4. 열해석 모의실험 결과

모의실험 조건에 따라 열해석 모의실험을 실시하였을 때,

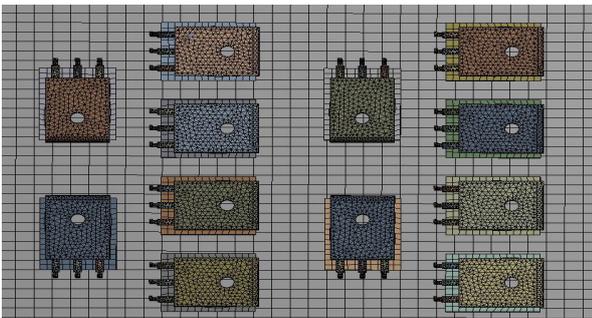


그림 3 디지털 해석 모델
Fig. 3 Feature of digital analysis model

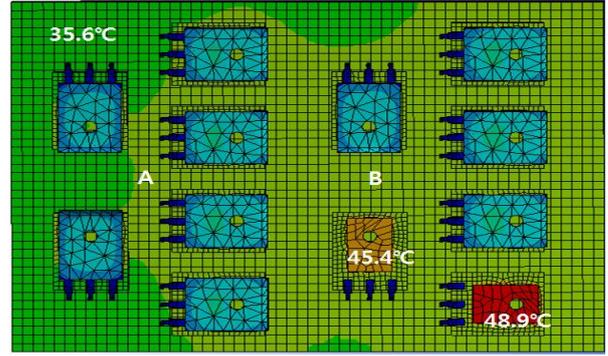


그림 4 3-레벨 AFE 정류기의 열해석 모의실험 결과
Fig. 4 Simulation result of 3-level AFE rectifier

육안으로 판단할 수 있는 최고온도는 스위치와 맞닿아있는 절연패드에서 43.6℃이며, 최저온도는 스위치 케이스에서 33℃로 나타났다. 이렇게 패드와 스위치 케이스의 온도차이가 나는 원인으로서는 공기중으로 방열이 되는 스위치의 표면적이 맞닿아 있는 패드의 한 부분 보다 넓기 때문에 온도상승이 적음을 알 수 있다. 방열판의 온도분포는 평균 약 39℃이며, 방열이 일어나는 스위치와 다이오드가 밀집된 부분인 B 영역이 A영역보다 약3℃정도 높게 나타났다. 실제 방열이 일어나는 스위치와 다이오드의 내부온도는 48.9℃, 45.4℃이며, 내부 열원으로부터 발생한 열이 방열판과 외부로 원활히 전달됨을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 반도체 변압기용 AFE 정류기 1 모듈의 열해석 모의 실험을 진행하고 결과를 분석하였다. 열해석을 위해 AFE 정류기의 스위칭 소자와 다이오드에서 발생하는 스위칭 손실 및 도통손실을 계산하였으며, 이를 열해석 시뮬레이션에 반영하였다. 모의실험은 3kW 조건에서 90W의 손실을 가정하고 진행되었으며, 최고온도 48℃, 최저온도 33℃의 온도분포를 확인하였다. 본 연구에서 다른 열해석 모의실험은 반도체 변압기용 AFE 정류기 모듈 최적화에 도움이 될 것으로 기대된다.

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업임(Nb2016 A419 0019)

본 연구는 한국전력공사 전력연구원에서 수행중인 “저압 직류배전망 독립성 실증 연구” 과제의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(D3080)

참고 문헌

- [1] Gabriel Ortiz, Michael Georg Leibl, Jonas Emanuel Huber, Johann Walter Kolar, "Design and Experimental Testing of a Resonant DC DC Converter for Solid State Transformers", IEEE Trans. P.E., Vol. 32, No. 10, 2017, Oct.
- [2] 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.
- [3] 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.