5kVA 3레벨 PFC 컨버터의 열해석 모의 및 실험적 비교

이도홍, 한유, 최동민, 조영훈, 최규하
건국대학교

5kVA 3-level PFC Converter in Thermal Analysis : Comparison of Simulation and Experiment

Do Hong Lee, Yu Han, Dong Min Choi, Younghoon Cho, Gyu Ha Choe
Konkuk University

ABSTRACT

This paper presents comparison of simulation and experiment in thermal analysis of 3 level PFC. Thermal analysis is necessary to optimize the power conversion system to get higher efficiency. Accordingly, analysis via simulation tools and analytic methods is performed to predict the power losses of converter. Consequently, thermal results of 3 level PFC experiment is compared with thermal analysis.

1. 서 론

전력변환장치에서 방열판은 시스템의 안정성, 무게, 부피 및 가격 등을 결정하는데 있어 중요한 요소이다. 전력변환장치에서 방열판의 크기는 시스템의 손실과 관계가 있으며, 시스템의 손실이 적을수록 방열판의 크기를 줄일 수 있다. 그러나 전력변환장치의 방열설계에 있어 시스템의 손실과 방열판의 크기에 대한 정확한 지표가 없다는 문제점이 있다. 본 논문에서는 3레벨 PFC 컨버터의 각 소자에 대한 손실분석을 통해 열해석 시뮬레이션을 수행하고, 실제 실험과의 비교를 통해 손실분석과 열해석 시뮬레이션의 유효성을 확인한다.

2. 3레벨 PFC 컨버터의 손실해석

2.1 3레벨 PFC 컨버터

3레벨 PFC 컨버터는 기존의 3레벨 NPC 인버터의 최상단과 최하단 스위치를 다이오드로 대체한 회로구조이다. 3레벨 PFC 컨버터는 멀티레벨 회로의 기능을 유지하면서 NPC 인버터에 비하여 능동 스위칭소자의 수를 줄일 수 있으며 제어가 간단해진다는 장점이 있다. 그림 1은 3레벨 PFC 컨버터의 스위칭 상태에 따른 전류흐름을 나타낸 그림이다. PFC 기능을 수행하기 위하여, 컨버터는 입력전압과 전류의 역률을 1로 제어하여 AC DC 변환을 수행한다.

2.2 소자의 손실 해석

3레벨 PFC 컨버터의 열 해석을 진행하기 위하여, 컨버터의 각 소자에 대한 손실을 분석하였다. 3레벨 PFC 컨버터의 손실요소는 크게 스위칭 소자에 의한 손실과 수동소자에 의한 손실로 나눌 수 있다. 수동소자의 손실요소는 커패시터의 등가직렬저항 성분에 의한 손실과 인덕터 코어와 권선에 의한 손실로 나눌 수 있다. 그러나 방열설계에 있어 스위칭 소자에 의한 발열이 주요 고려사항이므로, 본 논문에서는 스위칭 소자에 의한 손실성분만을 해석하고, 열해석 시뮬레이션을 통하여 결과를 비교하였다.

2.2.1 MOSFET 손실[1]

MOSFET에 의한 손실은 MOSFET 채널 도통 시 발생하는 순시 도통손실 P_{M-cond}와, MOSFET의 능동 스위칭 시 발생하는 순시 스위칭 손실 P_{M-sw}의 합으로 근사된다. MOSFET의 도통손실 P_{M-cond}과 스위칭 손실 P_{M-sw}은 다음과 같다.

$$P_{M-cond} = \frac{1}{T_{sw}} \int_0^{T_{sw}} (V_{DS} \cdot i_D) dt = R_{DS(on)} \cdot i_{Drms} \quad (1)$$

$$P_{M-sw} = \frac{1}{2} (V_{DS} \cdot i_D) \cdot (t_{on} + t_{off}) \cdot f_s \quad (2)$$

본 논문에서는 3레벨 PFC 컨버터의 스위치 S1과 S2를 각각 제어하여, 이상적인 경우 인덕터 전류가 항상 MOSFET 채널을 통하여 도통하므로, MOSFET의 내부 역 병렬 다이오드에 의한 손실은 무시하였다. 또한 발열에 의한 $R_{DS(on)}$의 변화와 기생 커패시턴스에 의한 손실도 무시하였다.

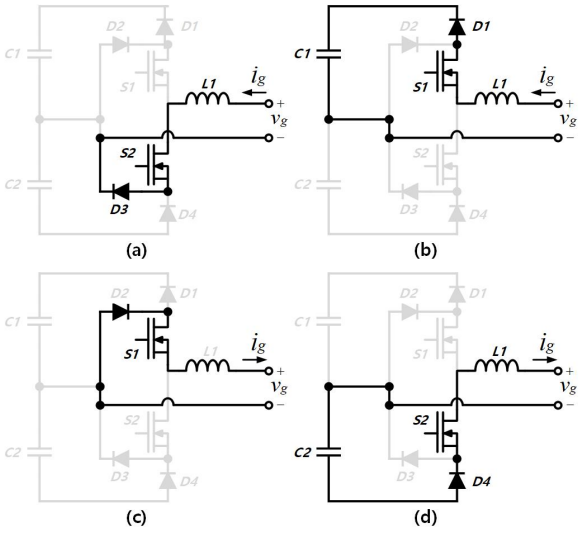

그림 1 3레벨 PFC 컨버터의 스위칭 상태와 전류
Fig. 1 Switching State and Current of 3-level PFC Converter

2.2.2 다이오드 손실[2][3]

다이오드의 손실은 순방향 도통 시 발생하는 손실 P_{d-cond}와 다이오드의 역 회복 시간 동안 발생하는 손실 P_{d-rr}의 합으로 근사된다. 다이오드의 도통손실 P_{d-cond}와 역 회복 손실 P_{d-rr} 은 다음과 같이 표현된다.

$$P_{d-cond} = V_{TH} \cdot I_{Favg} + R_D \cdot I_{Frms}^2 \quad (3)$$

$$P_{d-rr} = f_s \cdot (V_R \cdot I_{RRM} \cdot t_b)/6 \quad (4)$$

본 논문의 3레벨 PFC 컨버터는 다이오드 D1,D4에 흐르는 전류와 다이오드 D2,D3에 흐르는 평균전류의 크기가 다르므로 각 다이오드의 평균전류를 고려하여 다이오드의 동작점을 가정하고 손실을 계산하였다.

2.3 소자의 손실 계산

3레벨 PFC 컨버터의 각 소자에 대하여, 5kVA 조건에서 각 소자의 손실을 계산하였다. MOSFET은 CREE사의 SiC MOSFET C3M0065090D, 다이오드는 FAIRCHILD사의 SiC 다이오드 RURG8060이 사용되었다. 예상 실험조건과 각 소자의 데이터시트에 표기된 소자의 특성을 이용하여 3레벨 PFC 컨버터의 각 소자에 대하여 손실을 계산 하였으며, 계산 결과는 표 1에 나타내었다.

표 1 3레벨 PFC 컨버터 각 소자의 손실
Table 1 Losses of Each Device of 3-level PFC converter

Losses of Converter					
MOSFET (S1 , S2)			Diode (D2 , D3)		
$P_{loss-cond}$	6.24	W	P_{d-cond}	2.47	W
$P_{loss-sw}$	0.49	W	P_{d-rr}	0.045	W
Diode (D1 , D4)					
P_{d-cond}	4.86	W			
P_{d-rr}	0.045	W			

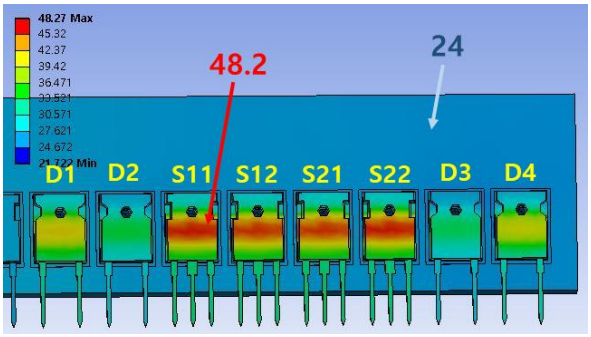

그림 2 열해석 시뮬레이션 결과
Fig. 2 Result of Thermal analysis simulation

3. 열해석 모의 및 실험결과

3.1 열해석 모의

ANSYS 16.2의 Steady State Thermal Tool을 이용하여 3레벨 PFC 컨버터의 실제 시스템을 모델링 하고, 정상상태 열해석을 진행하였다. 그림 2는 시뮬레이션 모의분석 결과이다. 각 소자의 내부에 계산한 손실만큼의 열을 일으키는 열원이 있다고 가정하였으며 알루미늄(Al) 방열판의 방사율은 0.9로 가정하였다. 또한 외기온도 25℃에서 각 소자의 표면과 방열판에서 자연 방열이 일어나도록 설정하였다. 스위치와 방열판 사이에 부착한 실리콘 재질의 패드를 통하여 스위치 발열의 25%가 전달되도록 시뮬레이션 하였다.

3.2 실험결과

5kVA 조건에서 3레벨 PFC 컨버터 실험을 진행하였다. 입력전압 $221\,V_{rms}$, 입력전류 $22.42\,A_{rms}$ 조건에서 최대효율은 97.94%이다. 이때 컨버터의 총 손실은 약 $102\,W$이다. 그림 3은 5 kVA 조건에서 3레벨 PFC 컨버터의 동작 시 온도를 fluke 사의 Ti100 온도 건으로 촬영한 결과이다. 시뮬레이션과의 오차가 있으나 소자에서 발생하는 온도는 비슷한 결과를 보였다.

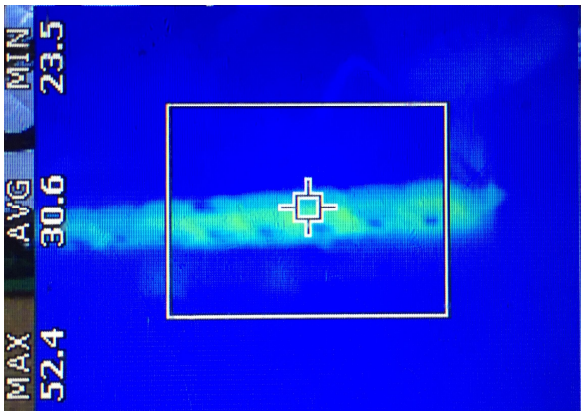

그림 3 3레벨 PFC 컨버터의 5kVA 동작 시 온도
Fig. 3 Thermal Result of 5kVA 3-level PFC converter

4. 결 론

본 논문에서는 3레벨 PFC 컨버터에 각 소자에 대하여 손실분석을 진행하고, 열해석 시뮬레이션을 진행하였다. 5kVA 조건에서 열해석 시뮬레이션 결과 3레벨 PFC 컨버터의 최대온도는 48℃ 내외였고, 실제 실험 시 약 52℃로 비슷한 결과를 보였다. 전력변환시스템을 구현하기 전, 열해석 시뮬레이션을 통하여 시스템 방열에 대한 지표를 가늠할 수 있을 것으로 기대된다. 차후 열해석과 방열설계에 대한 많은 연구가 필요하다.

이 논문은 산업통상부와 한국산업기술진흥원이 지원하는 건국대학교 공학교육혁신사업의 지원을 받아 작성되었음

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

참 고 문 헌

[1] Dusan Graovac, Marco Purschel, Andreas Kiep, “MOSFETPower Losses Calculation Using the Data Sheet Parameters,” Infineon Application Note, July 2006.

[2] STMicroelectronics, “Calculation of conduction losses in a power rectifier,” AN604 Application note, 2011.

[3] Peter Haaf, Jon Harper, “Diode Reverse Recovery and its Effect on Switching Losses,” Fairchild Semiconductor Application Note, Nov. 2006.