

SiC MOSFET을 이용한 500kW 온라인 UPS 손실 예측 및 검증

김민성, 이태승, 이동주
국제통신공업(주) 기술연구소

Loss Prediction and Validation of 500kW Online UPS Using SiC MOSFET

Min-Seong Kim, Tae-Seung Lee, Dong-Ju Lee
R&D Dept KUKJE Electric Mfg. Co., Ltd.

ABSTRACT

본 논문은 우수한 전력 변환 특성을 가진 SiC (Silicon Carbide) MOSFET을 이용한 500kW급 무정전전원장치 (UPS: Uninterruptible Power System) 손실 특성에 대한 예측 및 평가를 논한다. SiC MOSFET 2개가 직렬로 연결된 하프 브릿지 전력 모델을 기초로 하여, 손실을 예측하기 위한 방법을 고찰하고 예측 결과와 실제 500kW SiC UPS 손실을 비교하여 타당성을 검증한다. 이를 통해 SiC 전력 반도체로 구성된 전력변환장치의 설계를 용이하게 만들고, 그 특성에 대해 통찰을 제공한다.

1. 서 론

전력전자 연구는 전력 밀도와 효율을 향상하는데 주안점을 두고 있다^[1]. Wide Band Gap 소자인 SiC 반도체는 Si 소자보다 전도 손실이 낮고, 빠른 전력 변환 속도를 가지기 때문에^[2] 기존의 전기적 특성을 개선하고 연구 목표를 달성할 수 있다. SiC MOSFET은 더 높은 전력 장비에서 응용될 수 있으며 병렬로 연결하면 효율, 밀도, 비용 측면에서 효과적이다^[3]. UPS(Uninterruptible Power System)는 안정적인 대전력 관리를 위해 SiC MOSFET을 병렬 시스템으로 사용할 수 있다. 산업적으로 널리 사용되는 Online UPS는 계통과 부하 사이에 설치되며 실시간으로 계통 전원을 감시하고 부하에 높은 품질의 전력을 공급 및 정전 시 비상 전원을 제공한다. 이러한 역할 수행을 위해 정류기, DC-DC 컨버터, 인버터로 이루어진 전력 변환부가 존재하고, 요구에 따라 필요한 전력을 공급한다. SiC MOSFET은 UPS의 전력 변환부에 사용되어 부하 용량에 맞춰서 적용될 수 있다. 그러나 SiC MOSFET이 병렬 연결된 시스템은 동적, 정적 불균형을 유발하고 의도치 않은 고장을 발생시킬 수 있으며 대전력 애플리케이션 적용에 장애가 된다^[4]. SiC MOSFET을 UPS에 적용하기 위해서는 기존 전력 반도체에 사용된 소자 및 회로와 달라져야 하며, 이를 실제로 제조하는데 정확한 설계가 요구된다. 그러한 의미에서 500kW Online SiC UPS와 같은 대전력 변환 장치 개발에 앞서 그 손실과 특성을 예측하는 것은 설계에 앞서 수행되어야 하는 중요한 단계다. 본 논문은 자사에서 개발 중인 500kW Online SiC UPS의 구조에 대한 손실 시뮬레이션을 통해 설계에 필요한 손실 값을 예측하고 실제 개발 중인 UPS 시제품과 비교하여 그 예측을 검증한다.^[1]

2. 본 문

2.1 UPS 손실 예측

정상상태의 Online UPS 손실은 전력 변환부인 정류기, 인버터의 손실을 합하면 알 수 있다. 해당 전력 변환부들은 스위칭 소자와 주변부 소자의 손실을 확인하면 손실 값을 특정할 수 있다. 스위칭 소자인 SiC MOSFET은 스위칭 및 통전 손실을 계산하고, 주변부 소자는 임피던스와 동작 환경을 고려하여 손실을 예측한다. 500kW Online UPS은 입출력이 3상 4선이며 전력량을 고려하여 한 상에 SiC MOSFET 하프 브릿지 모듈을 4개 병렬로 제작한다. SiC MOSFET은 Microsemi社의 하프 브릿지 모듈인 MSCSM120AM02CT6LIAG를 사용하였으며 전기적 특성은 표 1과 같다.

표 1 MSCSM120AM02CT6LIAG 사양
Table 1 MSCSM120AM02CT6LIAG Specification

Parameter	Conditions	Value
V_{DSS}	$V_{GS} = 0V, I_{DSS} = 1mA$	1,200V
V_{GSS}		-10V ~ 25V
I_{DS}	$T_C = 80^\circ C$	754A
$V_{GS(th)}$	$V_{DS} = V_{GS}, I_{DS} = 100mA$	2.8V
$R_{DS(on)}$	$V_{GS} = 18V, I_{DS} = 800A$ $T_J = 150^\circ C$	2.6m Ω

2.1.1 정류기 손실 예측

정류기는 계통 측 입력 AC를 Online UPS의 입력으로 활용하여 DC로 변환한다. 그 구조를 구분하면 스위칭 소자인 하프 브릿지 SiC 모듈과 그 주변부 전장품으로 나눌 수 있다. SiC 모듈의 손실은 더블 펄스 테스트(Double Pulse Test)와 제조사에서 제공된 사양서를 기반으로 계산된다. 정류기의 손실은 표 2와 같이 나타나며 최종적으로 4,630W의 전력이 손실된다. 모든 전력 변환부 및 주변부 전장품 중에서 정류기의 손실이 가장 크게 나타나는 이유는 부하 용량에 더해 시스템 유지 전원까지 공급하므로 더 많은 입력 전력이 필요하기 때문이다.

2.1.2 인버터 손실 예측

인버터는 Online UPS 내부의 DC 전력을 AC 출력으로 변환하여 부하에 전원을 공급한다. 구조는 정류기와 거의 동일하

게 스위칭 소자인 하프 브릿지 SiC 모듈과 그 주변부 전장품으로 나눌 수 있다. SiC 모듈의 손실은 동일한 제품을 사용하므로 더블 펄스 테스트와 제조사에서 제공된 사양서를 참조한다. 인버터의 손실은 표 3과 같이 3,659W로 계산되었다.

표 2 정류기 손실 예측표
Table 2 Table of Rectifier Loss

구분	손실 구분	손실 [W]	손실 비율[%]	
스위칭 소자	MOSFET	Conduction	143	1.2
		Turn ON	469	4.0
		Turn OFF	193	1.7
	Diode	Conduction	92	0.8
		Recovery	541	4.6
제어 회로		90	0.8	
정류기 냉각 팬		750	6.4	
필터 리액터		2,322	19.9	
필터 커패시터		30	0.3	
소 계		4,630	39.8	

표 3 인버터 손실 예측표
Table 3 Table of Inverter Loss

구분	손실 구분	손실 [W]	손실 비율[%]	
스위칭 소자	MOSFET	Conduction	583	5.0
		Turn ON	456	3.9
		Turn OFF	200	1.7
	Diode	Conduction	236	2.0
		Recovery	110	0.9
구동 PCB		90	0.8	
인버터 냉각 팬		750	6.4	
필터 리액터		1,203	10.3	
필터 커패시터		30	0.3	
소 계		3,659	31.4	

표 4 주변부 전장품 손실 예측표
Table 4 Table of Peripheral Unit Loss

구분	손실 [W]	손실 비율 [%]
스태틱 스위치	2,160	18.5
스태틱 스위치 냉각 팬	500	4.3
DC 커패시터	270	2.3
HMI 모듈	7	0.1
UPS 제어 PCB	30	0.3
외함 배기 팬	180	1.5
외함 배기 팬	210	1.8
소 계	3,357	28.8

2.2 손실 예측 검토

표 4는 전력 변환부를 제외한 회로 소자로부터 발생하는 손실을 예측한 표이다. 해당 소자들은 실제 UPS 설계에 실제 사용되는 전장품 모델의 사양서를 참조하였고 손실을 계산하였다. 각 표 2, 3, 4에서 확인된 손실 값들을 모두 더하면 최종적으로 손실 비율 100%로써 UPS 시스템 유지에 필요한 손실을 확인할 수 있다. 시스템 유지 손실은 총 11.646W이다.

$$\frac{500,000}{500,000 + (4,630 + 3,659 + 3,357)} * 100 = 97.72 \quad (1)$$

식 (1)과 같이 97.72%의 효율로 확인되었다. 해당 예측값을 토대로 실제 SiC UPS를 설계하여 시제품을 제조하였고 그림 1과 같은 결과를 확인하였다. 시제품에서 확인된 결과는 입력 전력 각각 511.01kW, 495.69kW 였으며 시스템 유지 전원

은 약 16kW로, 효율은 97.0%으로 나타났다. 통상적으로 시물레이션의 결과값이 실제보다 다 나온 경향이 있음을 고려해도 예측 오차는 전체 500kW 용량에 대해 1% 미만으로 발생하였으며 손실 및 효율 예측이 유효했으므로 결론내릴 수 있다.

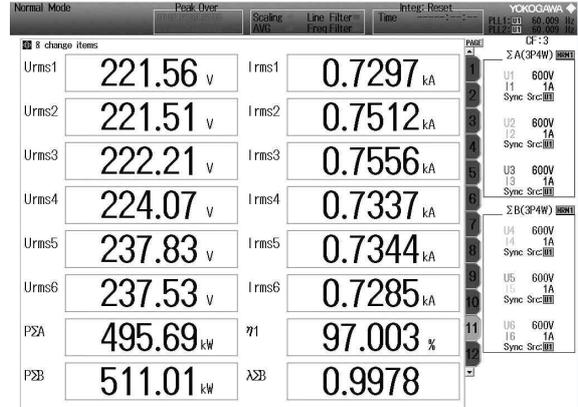


그림 1 500kW SiC UPS 시제품 시험 결과
Fig. 1 500kW SiC UPS Prototype Test Result

3. 결론

본 논문은 SiC MOSFET을 적용한 500kW Online UPS의 손실을 예측하고 설계에 반영했을 때 결과를 비교하였다. UPS의 각 전력 변환부의 손실을 계산하고 주변 전장품의 손실까지 합친 예측값이 실제 설계가 반영된 UPS와 비교했을 때 손실이 근사할 수 있다는 것을 확인하였다. 결과적으로 이러한 손실 예측이 실제 설계 및 제조에 유의미하며 그 특성을 확인할 수 있음을 알 수 있다.

이 논문은 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (20212020800020. 통합형 최적설계 플랫폼 기반 초고효율 전력변환시스템 개발)

참고 문헌

- [1] J. G. Kassakian and T. M. Jahns, "Evolving and emerging applications of power electronics in systems," IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron., vol. 1, no. 2, pp. 47 - 58, Jun. 2013.
- [2] J. Knoll, C. DiMarino, H. Stahr and M. Morianz, "A PCB-Embedded 1.2 kV SiC MOSFET Package With Reduced Manufacturing Complexity," in IEEE Open Journal of Power Electronics, vol. 4, pp. 549-560, 2023.
- [3] Y. Wen, Y. Yang and Y. Gao, "Active Gate Driver for Improving Current Sharing Performance of Paralleled High-Power SiC MOSFET Modules," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 2, pp. 1491-1505, Feb. 2021.
- [4] Q.Wu, M.Wang, W. Zhou, and X.Wang, "Current balancing of paralleled SiCMOSFETs for a resonant pulsed power converter," IEEE Trans. Power Electron., vol. 35, no. 6, pp. 5557 - 5561, Jun. 2020.