2021 년도 한국철도학회 추계학술대회 논문집 KSR2021A155

철도차량 승압형 DC-DC 컨버터의 고주파 구동을 위한 전력용 반도체 소자 특성 비교 분석

Comparative Analysis of Semiconductor Devices for High Frequency Driving of DC-DC Boost Converter on Railway System

홍성용*, 임재현*, 류상균*, 이재범*†

Seong Yong Hong*, Jae Hyeon Lim*, Sang Gyun Ryu*, Jae Bum Lee*†

초 록 본 논문에서는 철도차량 승압형 DC-DC 컨버터에 사용되는 전력용 반도체 소자 특성을 비교 분석하였다. 스위칭 시 발생하는 손실은 고주파 구동과 직결된다. 따라서 본 논문에서는 Si-IGBT, Hybrid-SiC, Full-SiC 총 세 개 소자의 도통 손실, 턴-온/오프 스위칭 손실, 용량성 손실을 계산하여 비교 분석하였다. Si소자에서 SiC소자로 변화함에 따라 감소하는 손실 값을 제시하고, 같은 손실 대비 SiC소자의 고주파 구동의 가능성을 보여준다. 결과적으로 Full-SiC소자 사용 시 Si-IGBT소자 사용 대비 스위치 손실의 감소를 통해 고주파 구동의 용이성을 도출하였다.

주요어 : 철도차량, DC-DC 컨버터, 고주파 구동, SiC소자

1. 서 론

최근 일본에서 세계 최초로 고속열차에 SiC 소자를 적용하여 컨버터의 스위칭 손실 감소와 시스템 개선을 하였다. 이에 따라 우리나라에서도 SiC소자를 이용한 전력변환장치의 개선에 대한 필요성이 대두되고 있다[2],[3].

현재 철도차량에 사용 중인 Si-IGBT소자의 특성상 고주파 구동이 어렵고 승압형 컨버터는 소자의 영전압/영전류 스위칭이 불가능하므로 턴-온/오프 스위칭 손실이 크게 발생한다. 따라서 스위칭 주파수를 올리는 데 한계를 갖는다. 이러한 한계점을 개선하기 위해 철도차량 승압형 DC-DC 컨버터의 전력용 반도체 소자별 특성을 비교 분석하고자 한다.

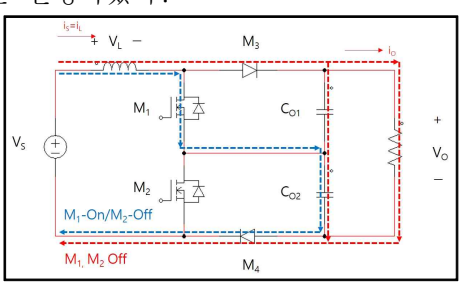
본 논문에서는 수소연료전지 하이브리드 철도차량 DC-DC 컨버터의 기본사양[입력전압(750[V]), 출력전압(1,260~1,700[V]), 출력전력(250[kW])]을 적용하였고, 승압형 컨버터로서 3-Level 부스트 컨버터를 채택하였다[1].

† 교신저자: 한국교통대학교 철도대학 철도전기전자전공

* 한국교통대학교 철도대학

2. 본 론

3-Level 부스트 컨버터는 출력전압의 반(850[V])이 소자의 전압 스트레스이며 입력전류(334[A])가 소자에 흐르는 전류이다. 위 조건을 바탕으로 1,700[V], 600[A] 이상의 조건에서 소자를 선정하였다.



<그림1> 3-Level 부스트 컨버터

2.1 2 Parallel

Full-SiC소자 선택에 있어 600[A] 이상의 소자를 찾는 데 어려움이 있었다. 소자 전류 한계치 이상의 전류가 흘렀을 경우 소자 소

손으로 이어지기 때문에 소손 예방을 위한 소자의 전류 분배를 위해 2 Parallel로 설계를 진행하였다.

2.2 스위치 손실

스위치 손실은 출력전압이 가장 큰 조건[V_S(750[V]), V_O(1,700[V]), P_O(250[kW]), I_{in}(334[A]), D(0.559)]에서 계산하였다.

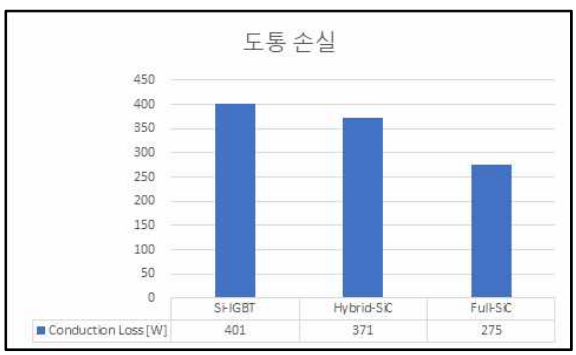
스위치로 동작하는 M_1의 평균 전류와 다이오드로 동작하는 M_3의 모듈로 구성된 Si-IGBT소자의 손실은 8[kHz] 스위칭 주파수 구동 시, 2,415[W]이다. 선정된 Si-IGBT소자가 125℃에서 견딜 수 있는 최대 손실(P_D)이 2,500[W]이므로 스위칭 주파수는 8[kHz]로 선정하였다.

2.2.1 도통 손실

IGBT의 도통 손실은 [I_{Avg}·V_{CE}]로 나타낼 수 있으며, MOSFET의 도통 손실은 [I_{rms}^2·$R_{DS(ON)}$]으로 나타낼 수 있다. Si소자에서 SiC소자로 갈수록 $V_{CE\text{-}sat}$ 및 V_{EC}가 줄어들기 때문에 도통 손실이 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

Type.	Si-IGBT	Hybrid-SiC	Full-SiC
회사	MITSUBISH	MITSUBISH	CREE
Select Device	CM1000DUC-34SA	CMH1200DC-34S	CAS300M17BM2
P_D	2,500 [W]	1,687 [W]	440 [W]
$R_{DS(ON)}$	-	-	0.012 [Ω]
$V_{CE\text{-}sat}$	2.1 [V]	2.25[V]	-
V_{EC}, V_{SD}	2.8 [V]	2.2 [V]	1.2 [V]

<표1> 소자별 도통 손실 요소



<그림2> 소자별 도통 손실

2.2.2 스위칭 손실

스위칭 손실은 [(E_{on}+E_{off})·F_S]로 나타낼 수 있고 E_{on}과 E_{off}는 t_r, t_f, F_S값에 비례한다. Si소자에서 SiC소자로 갈수록 t_r, t_f이 작아지기 때문에 E_{on}, E_{off} 값이 작아지고 손실이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Type.	Si-IGBT	Hybrid-SiC	Full-SiC
E_{on}	0.082 [J]	0.025 [J]	0.013 [J]
E_{off}	0.110 [J]	0.100 [J]	0.01 [J]
E_{rr}	0.05 [J]	-	-
t_r, t_f	297, 340 [ns]	150, 150 [ns]	68, 52 [ns]

<표2> 소자별 스위칭 손실 요소

<그림3> 소자별 스위칭 손실

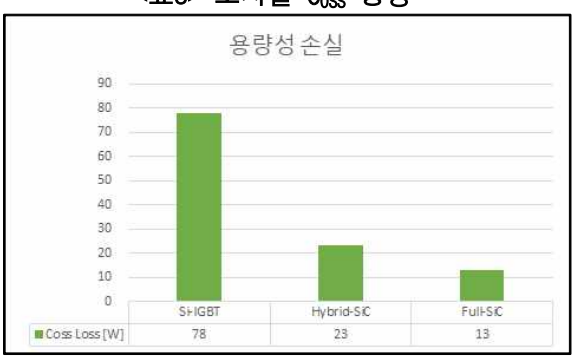
2.2.3 용량성 손실

용량성 손실은 [0.5·C_{OSS}·(V_O/2)^2·F_S]으로 나타낼 수 있고 C_{OSS}용량 및 F_S에 비례한다는 것을 알 수 있다.

Si소자에서 SiC소자로 갈수록 C_{OSS} 용량이 작아져 용량성 손실이 작아지는 것을 확인할 수 있다.

Type.	Si-IGBT	Hybrid-SiC	Full-SiC
C_{OSS}	27 [nF]	8 [nF]	4.5 [nF]

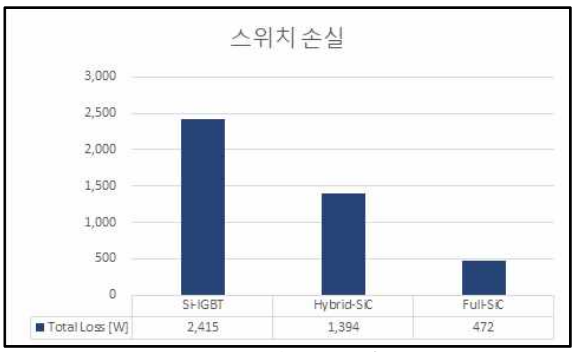
<표3> 소자별 C_{OSS} 용량



<그림4> 소자별 용량성 손실

2.2.4 스위치 총 손실

스위치 손실은 도통 손실, 온/오프 스위칭 손실, 용량성 손실을 모두 더한 값이다. Si소자에서 SiC소자로 갈수록 각 손실이 줄어듦으로 총 스위치 손실이 줄어드는 것을 <그림5>를 통해 확인할 수 있다.



<그림5> 소자별 스위치 손실

2.3 고주파 구동

8[kHz]] 구동 시 Si-IGB소자의 손실은 2,415 [W]이다. 스위치 손실은 스위칭 주파수에 비례하기 때문에 Si-IGBT의 손실을 기준으로 Hybrid-SiC와 Full-SiC소자의 손실을 Si-IGBT소자의 손실과 동일하게 한다 가정하였을 경우, 스위칭 주파수를 8[kHz] 이상으로 구동이 가능하다는 결론을 예상할 수 있다.

3. 결 론

위 그림에서 제시한 바와 같이 소자별 특성 및 손실 비교 분석을 통하여 Si소자에서 SiC소자로 갈수록 손실이 작아지고 고주파 구동의 가능성을 확인했다. 하지만 현재 Full_SiC소자는 Si-IGBT, Hybrid--SiC소자에 비해 최대 손실(P_D)이 낮아 고주파 구동으로 사용함에 있어 어려움이 존재한다.

향후 고전압 Full-SiC소자의 개발과 상용화에 따라 본 논문의 결과를 바탕으로 철도차량의 전력변환장치의 전력용 반도체 소자를 Si-IGBT에서 Full-SiC로 대체가 가능할 것이라 예상한다.

참고문헌

[1] 이재범, 조인호 (2019) 수소연료전지 하이브리드 철도차량용 DC-DC 컨버터의 고밀도-경량화를 위한 전력변환회로 연구, 한국철도학회 논문집, 22(10), 779-807

[2] 이재범, 이형우, 박찬배 (2020) 수소연료전지 하이브리드 철도차량 동력시스템 기반 승압형 DC-DC 컨버터, 철도저널, 23(5), 40-46.

[3] K. Sato, H. Kato and T. Fukushima (2018) Development of SiC Applied Traction System for Shinkansen High-speed Train, 2018 International Power Electronics Conference, pp.3478-3483