

대용량 WBG 전력반도체를 이용한 철도 차량용 추진 인버터

최근 자동차, 철도 차량, 선박 등 이동수단에서 에너지를 효율적으로 사용하기 위해 추진 시스템 기술 개발이 진행되고 있다. 추진 인버터는 전력반도체와 수동소자로 이뤄진 시스템으로, 차세대 전력반도체가 개발되면서 경량화와 모듈화를 중점으로 기술이 발전하고 있다. 본 원고에서는 철도 차량에 적합한 WBG 전력반도체에 대해 알아보고, 국내의 기술 개발 현황에 대해 소개하고자 한다.

1. 서론

최근 미국, 영국, 일본, 캐나다 등 주요 국가에서 탄소 중립을 선언함에 따라 세계적인 탄소 중립 체제에 돌입하였다. 이에 따라 생산되는 전기에너지를 효율적으로 사용하기 위해 자동차나 철도 차량, 선박 등 모빌리티 산업에서는 전력반도체의 고성능, 고효율화 및 소형화가 필요하다. 철도 차량 추진 시스템의 성능, 효율성, 소형화 및 신뢰성은 전력변환장치의 발전과 고효율 전동기의 사용으로 향상되고 있다. 1950년대 사이리스터(SCR)가 최초로 개발되었고, 1980년대부터 사용한 사이리스터 적용 추진용 전류원 인버터는 대전압, 대전류용 인버터에 주로 사용되던 방식이었다. 하지만 사이리스터 기반 추진 전류형 인버터는 제어 성능이 낮고, 대용량 인덕터 사용에 따른 추진 시스템 경량화의 어려움에 따라 1990년대부터 실리콘(Si) 소재로 제작한 절연 게이트 바이폴라 트랜지스터(IGBT) 기반 추진용 전압원 인버터로 대체되었다. IGBT는 점차적으로 소자의 전류밀도 특성이 향상되어 전력반도체 특성이 비약적으로 발전했지만, 실리콘이 가지고 있는 물질의 이론적인 한계로 인해 WBG(Wide Band Gab) 전력반도체 기술이 개발되고 실용화되고 있다. 최근에는 일본과 유럽을 중심으로 여러 철도 관련 기업들도 WBG 소자를 추진 인버터에 적용하여 실용화 사례가 발표되고 있다.

WBG 전력반도체는 SiC(Silicon Carbide), GaN(Gallium Nitride), 인공 다이아몬드 등 WBG 소재 기반의 소자로 제작되는 것을 지칭하며, 기존 실리콘 소재로 제작한 전력반도체에 비해 밴드갭이 3배 이상 큰 전력반도체를 지칭한다. 이러한 WBG 전력반도체는 열 특성 향상, 고전압/고전류 전도, 스위칭 속도 강화 및 스위칭 손실 최소화 등 여러 강점을 갖는다. 철도 차량의 추진 인버터에서 발생하는 손실 중 전력반도체의 스위칭 손실과 도통 손실의 비중이 가장 크다. Si나 GaN으로 제작된 전력반도체를 이용할 경우, 기존의 실리콘 전력반도체보다 온저항을 크게 낮출 수 있고, 높은 스위칭 주파수 특성으로 인해 수동 소자의 크기를 감소시킬 수 있어서 궁극적으로 전력변환 모듈의 부피를 줄일 수 있다. 또한, 높은 온도에서도 동작하는 고온 동작의 특성으로 인해 추진 인버터의 냉각시스템을 크게 줄일 수 있다. 본 원고에서는 철도 차량에 적용 가능한 WBG 전력반도체에 대해 알아보고, 대용량 WBG 전력반도체가 적용된 국내외 추진 인버터 개발 동향에 대해 설명한다.

2. WBG 소자가 적용된 전력반도체 특징

전력반도체 소자는 크게 실리콘 기반 소자와 화합물 기반 소자로 구분된다. WBG 소자는 화합물 기반 소자로 결정이 두 종류 이상의 원소 화합물로 구성되어 있다. 실리콘 기반 반도체의 신뢰성과 효율성 문제로 인해 차세대 반도체로 소자로 넓은 에너지 준위 특성을 가지는 화합물 반도체가 개발되었다. 표 1은 실리콘 기반 소자와 화합물 기반 소자의 특성을 나타낸다. 화합물 기반 소자인 WBG 소자는 기존 실리콘 반도체 밴드갭(1.1eV)에 비해 3배 이상 넓은 밴드갭 특성을 가지고 있으며, 높은 열 전도율, 낮은 저항과 높은 내전압 특성, 안정적인 고온 동작으로 스위칭 손실이 저감되고, 고속 스위칭 및 방열 시스템 부피 축소 등의 장점을 가지고 있다. 현재 상용화된 대표적인 WBG 소자 기반 전력반도체는 SiC 반도체와 GaN

표 1 Si와 WBG 소자 비교

	Si	4H-SiC	GaN	Ga ₂ O ₃
밴드갭 에너지(eV)	1.1	3.3	3.4	4.7-4.9
전자 이동도(m ² V ⁻¹ s)	1400	1000	1200	3300
항복 영역(MV/cm)	0.3	2.55	3.3	8
Baliga factor	1	340	870	3444
열전도율(W/cm-K)	1.5	2.7	2.1	0.23

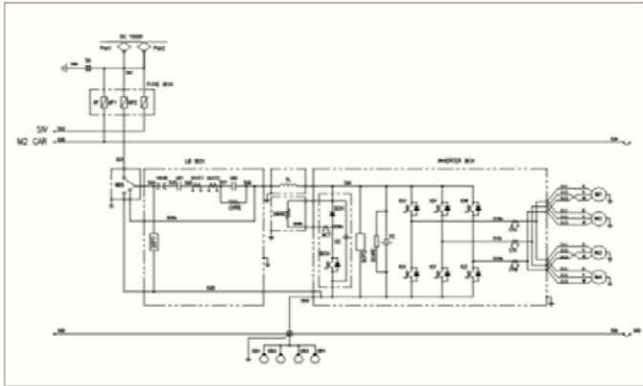


그림 1 직류 가선 1C4M 추진 시스템

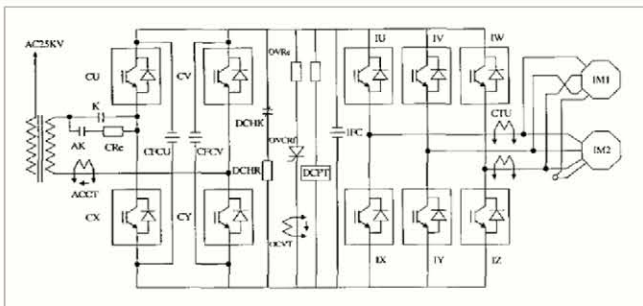


그림 2 교류 가선 1C4M 추진 시스템

반도체가 있다. 이 중 GaN 반도체는 SiC 반도체에 비해 내압성이 떨어지고, 현재 개발된 고절연-산화막 기술의 한계로 현재까지는 600V 이하 급의 소형 고주파 용도의 전력반도체들이 주로 개발되고 있다.

SiC는 규소와 탄소로 이루어진 화합물로 Si의 약 10배의 높은 절연과 전기 강도와 Si의 약 3배 넓은 밴드갭(3eV)을 가지며 전력반도체 제작에 필요한 P형, N형의 제어가 넓은 범위의 특성이 우수하여 전력반도체 소자를 위한 차세대 물질로 널리 알려져 있다. SiC는 결정 특성에 따라 3C-SiC, 6H-SiC, 4H-SiC 등으로 구분되며, 이들 중 4H-SiC가 수평과 수직에 대한 전자의 이동도가 빠르므로 전력반도체 제작에 적합하다. 기존 Si는 고내압화에 따른 온저항의 증가를 개선하기 위해 IGBT 등의 소수 캐리어 전력반도체가 주로 사용되었다. SiC는 고속 구조인 다수 캐리어 전력반도체에서 고내압을 실현할 수 있으므로 고내압, 낮은 온저항, 고속 스위칭을 동시에 실현할 수 있다. 또한, SiC는 소수 캐리어의 축적이 발생하지 않아 접합 용량을 방전할 정도의 작은 전류만 흐르므로 Si에 비해 리커버리 시간과 리커버리 전류가 작아 스위칭 오프 손실과 스위칭 오프 시 발생하는 전기적 노이즈를 줄일 수 있다. 대전류를



그림 3 Mitsubishi 사 3,300V/750A SiC 모듈

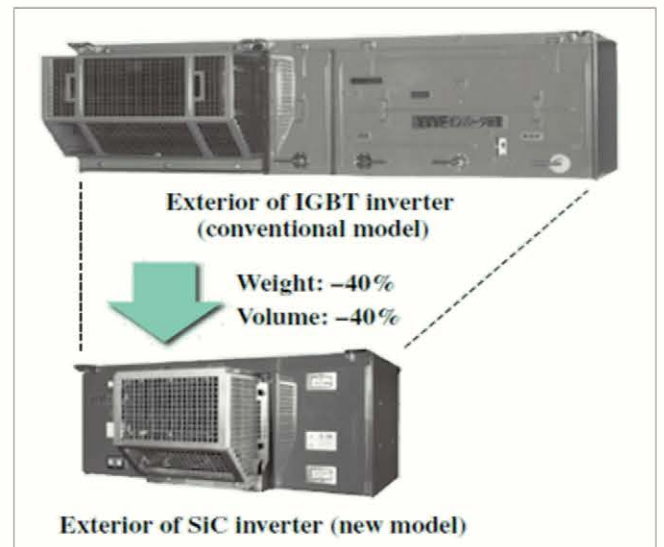


그림 4 IGBT 추진 인버터와 SiC 추진 인버터 비교



그림 5 수소연료전지 철도 차량 VVVF-SiC 인버터(1C1M 2ea)

취급하는 파워 모듈에는 Si IGBT와 SiC 쇼트키 다이오드를 쓰는 하이브리드 방식의 IGBT가 널리 사용되었다. 하지만 기술의 발전으로 최근에는 고 내전압 Full SiC가 출시되어 많은 산업 분야에서 사용되고 있다. Full SiC 전력반도체 모듈을 사용하면 IGBT의 Tail 전류와 다이오드에서 발생하는 리커버리 전류로 인한 스위칭 손실을 크게 줄일 수 있게 되었으며, 이는 전원 효율 개선 및 히트싱크, 히트파이프 등의 냉각 장치를 간소화시킬 수 있고, 동작 주파수의 고주파화에 따른 주변 소자의 소형화 등의 효과를 얻을 수 있다.

전기 철도 차량의 경우 속도에 따라 도시철도 차량과 고속철도 차량으로 구분할 수 있는데, 직류 가선을 사용하는 도시철도 차량의 입력 가선 전압은 DC 1,500V이고, 교류 가선을 사용하는 도시철도 차량 및 고속철도 차량의 입력 가선 전압은 AC 25,000V이다. 교류 가선을 사용하는 철도 차량은 주변압기를 거쳐 낮은 전압으로 변환되며 VVVF 인버터 입력에는 도시철도 차량은 약 1,700V, 고속철도 차량에는 약 2,800V

의 전압이 인가된다. 현재 도시철도 차량 전장품에서 사용되는 IGBT는 3,300V급 전력반도체가 사용되고 있으며, 고속철도 차량 전장품은 6,500V급 전력반도체가 사용되고 있다. 따라서 철도 차량 전장품에서 SiC 전력반도체가 IGBT를 대체하기 위해서는 고 내전압, 높은 전류가 흐를 수 있는 전력반도체 모듈을 사용해야 한다. 최근 SiC 전력반도체를 개발 및 생산하는 업체는 전세계적으로 많지만, 철도 차량에 적합한 고 내전압, 높은 전류 정격의 전력반도체 모듈을 생산하는 업체는 주로 많지 않다. 일본 Mitsubishi社は 3,300V/375A와 3,300V/750A급 Full SiC 전력반도체 모듈을 생산하고 있으며, 일본 Hitachi社は 3,300V/600A와 3,300V/800A급 Full SiC 전력반도체 모듈을 개발했지만 양산품은 아직 개발 중이다. 이 밖에도 Infineon, Fuji, Semikron 등 해외 여러 업체들이 고전압/대전류 Full SiC 전력반도체를 개발하고 있으나, 아직 상용화에 이른 업체는 Mitsubishi社가 유일하다고 볼 수 있다.

표 2 일본의 VVVF-SiC 추진 인버터 적용 사례 1

				
계열	N700S	근교형 821	E131/E261	6000형
운영사	JR 서일본	JR 큐슈	JR 동일본	고베시영지하철
등급	신칸센	도시철도 차량	도시철도 차량	도시철도 차량
추진 인버터	VVVF-SiC(3레벨)	VVVF-SiC(2레벨)	VVVF-SiC(2레벨)	VVVF-SiC(2레벨)
추진 인버터 제작사	Fuji	Hitachi	Hitachi	Hitachi
견인전동기	유도전동기	유도전동기	유도전동기	유도전동기
가선 방식	AC 20kV	AC 20kV	DC 1.5kV	DC 1.5kV

3. 대용량 SiC를 적용한 국내외 철도 차량용 추진 인버터

3.1 국내

국내 철도 차량은 대부분 IGBT를 이용한 VVVF 추진 인버터가 탑재되어 있다. 현재 한국철도기술연구원에서 (주)우진산전과 수소연료전지 기반 하이브리드 철도 차량을 개발 중인데, 이 철도 차량의 VVVF 추진 인버터에는 Mitsubishi 社의 3,300V/750A급 Full SiC(FMF750DC-66A)가 탑재되어 있으며, VVVF 추진 인버터와 332kW급 IPMSM(1량당 1CIM 2ea) 구동테스트를 모두 완료하였다. 수소연료전지 철도 차량의 VVVF 추진 인버터는 Full SiC 전력반도체 모듈을 사용함으로써 히트파이프 크기를 기존 IGBT VVVF 추진 인버터보다 약 40% 이상 감소시켰으며, 전력 효율은 기존 IGBT VVVF 인버터 효율 95%에서 97% 이상으로 증가시켰다. 2022년에는 주행테스트를 시작으로 철도 차량 Full SiC VVVF 추진 인버터 실증 및 적합성 연구를 시작한다.

3.2 국외

3.2.1 일본

일본은 현재 전세계에서 가장 많은 Full SiC VVVF 추진 인버터가 탑재된 철도 차량이 운행 중이다. 일본은 2000년대 이후 철도 차량 전장품의 고효율화와 경량화를 위하여 견인전동기를 유도전동기에서 영구자석동기전동기로 대체하였고, VVVF 추진 인버터 내 전력반도체를 SiC로 대체하였다. 철도를 대표하는 일본의 여러 업체 중 Mitsubishi 社は 세계 최초로 Full SiC



그림 6 중국 VVVF-SiC 인버터 적용 철도 차량

전력반도체 모듈 양산화에 성공하였으며, 이를 이용하여 전력소모량을 감소할 뿐만 아니라 철도 차량 전장품의 크기와 무게를 크게 줄일 수 있었다.

3.2.2 중국

중국 철도 차량 제조업체 China Railway Construction Corporation(CRCC)는 2018년 차세대 경량 지하철 Cetrovo를 제작하고, 2019년 6월 산둥성 칭다오에서 시운전을 완료하였다. 직류 1,500V 가선을 입력받은 Full SiC VVVF 추진 인버터와 영구자석동기전동기를 사용한 추진 시스템은 기존 지하철에 비해 15% 더 많은 에너지 효율성을 달성하였다. 이 철도 차량은 최대 140km/h의 속도를 출력할 수 있으며 -40℃의 온도 조건과 2,500m의 높은 고도에서도 동작이 가능하도록 설계되었다.

표 3 일본의 VVVF-SiC 추진 인버터 적용 사례 2

				
계열	80000형	TX-3000계	6020/3020/2020계	40000계
운영사	신케이세이	츠클루바	도큐전철	도쿄메트로
등급	도시철도 차량	도시철도 차량	도시철도 차량	도시철도 차량
추진 인버터	VVVF-SiC(2레벨)	VVVF-SiC(2레벨)	VVVF-SiC(2레벨)	VVVF-SiC(2레벨)
추진 인버터 제작사	Mistubishi	Hitachi	Mistubishi	Toshiba
견인전동기	유도전동기	유도전동기	영구자석동기전동기	영구자석동기전동기
가선 방식	DC 1.5kV	AC 20kV/DC 1.5kV	DC 1.5kV	DC 1.5kV



그림 7 스페인 VVVF-SiC 인버터 적용 철도 차량

3.2.3 유럽

2020년에 스페인 바스크 지방의 철도 제작 회사 EUSKOTREN은 Full SiC가 적용된 VVVF 인버터를 개발하기 시작했다. 추진 시스템을 경량화하여 에너지 효율성을 증대하여 탄소 중립을 실현하기 위해 SiC 전력반도체가 적용된 VVVF 인버터를 개발하고 있다.

4. 결론

최근 에너지를 효율적으로 사용하기 위해 전력변환장치의 기술 개발이 빠르게 성장하고 있고, 이에 따라 차세대 전력반도체의 수요는 점차 증가하고 있다. 국내 철도 차량 추진 시스템을 개발하는 기업들이 에너지 효율성을 극대화하기 위해 WBG 소자 기반 전력변환장치를 개발하고 있으나, WBG 소자 기반 전력반도체는 국내의 기술력 부족으로 해외 의존도가 높은 실정이다. 현재 일본을 제외하면 아직 WBG 소자 기반 전력변환장치 기술 개발이 더딘 상황이다. 국내 전력반도체 생산 업체들이 꾸준히 성장하여 전압/전류 정격이 큰 SiC나 GaN 전력반도체 모듈이 생산되고, 철도 차량 추진 시스템도 토폴로지의 변화, 기존 시스템의 문제점을 개선하는 방식으로 기술 개발이 이뤄진다면 세계에서 경쟁력 있는 추진 인버터 기술을 보유할 것으로 사료된다. ■

참고문헌

- [1] I. H. Cho and J. B. Lee, "Research on high-efficient power converters using WBG devices for auxiliary power supplies (APS) system," *Journal of Advanced Engineering and Technology*, pp. 203-208, 2017.
- [2] J. H. Lee, D. H. Jung, S. J. Oh, and J. P. Jung, "High technology and latest trends of WBG power semiconductors," *J. Microelectron. Packag. Soc.*, pp. 17-22, 2018.
- [3] K. Sato, H. Kato, and T. Fukushima, "Development of SiC applied traction system for shinkansen high-speed train," *2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia)*, pp. 3478-3483, 2018.
- [4] N. Soltau, E. Wiesner, E. Stumpf, S. Idaka, and K. Hatori, "Electric-energy savings using 3.3 kV full-SiC power-modules in traction applications," *2020 Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, pp. 1-5, 2020.
- [5] K. Hamada, S. Hino, N. Miura, H. Watanabe, S. Nakata, E. Suekawa, Y. Ebiike, M. Imaizumi, I. Umezaki, and S. Yamakawa, "3.3kV/1500A power modules for the world's first all-SiC traction inverter," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 54, pp. 4-7, 2015.

이준희 한국철도기술연구원 스마트전기신호본부 선임연구원

1987년 4월 20일생. 2013년 아주대 전자공학부 졸업. 2018년 동 대학원 전자공학부 졸업(공학).
2018년~2020년 한국철도기술연구원 스마트전기신호본부 박사후연수연구원.
2020년~현재 한국철도기술연구원 스마트전기신호본부 선임연구원.

