

철도차량용 MW급 소형 경량 반도체 변압기 모듈 개발

송승호, 김명룡

국립한국교통대학교, 한국철도기술연구원

Development of MW-range lightweight Solid-State Transformer Module for Railway Vehicles

Seung-Ho Song, Myung-Yong Kim

Korea National University of Transportation, Korea Railroad Research Institute

ABSTRACT

반도체 변압기는 기존의 크고 무거운 유입식 저주파 변압기를 대체하기 위한 기술로써, 인버터 및 컨버터와 같은 전력전자 기술을 기반으로 기존 변압기 기능을 구현하여 절연유를 사용하지 않아 환경 친화적이며, 고주파 스위칭을 통해 전력 변환이 이뤄지므로 소형 경량화가 가능하다.

국내 반도체 변압기 연구로는 도시철도차량에 적용하기 위한 2.1MW급 반도체 변압기 시제품이 2023년에 개발되었으며, 현차 시험을 통해 우수성 및 신뢰성이 검증되었으나 반도체 변압기의 고속철도차량 적용에 대한 연구는 현재 기초적인 수준이다.

반도체 변압기는 다수개의 모듈들이 직렬로 연결되어 고전압 대용량 시스템을 구성하는 것이 특징으로, 본 연구는 철도차량 적용을 위해 25kV 교류 입력, 3kV출력 전압 사양을 갖는 MW급 반도체 변압기 구축을 위한 300kW급 모듈의 설계에 대해 다룬다.

1. 서 론

최근 전력용 반도체 소자와 전력전자 기술을 발달로 기존의 저주파 변압기를 대체하는 반도체 변압기에 관한 연구가 진행 중이다^{[1], [2]}.

철도차량 추진시스템의 주변압기 및 컨버터는 25 kV, 60 Hz의 가선 전압을 인가받아 수 kV, 수 MW 직류 전력을 출력하여 추진 인버터와 차량에 전원을 공급한다. 추진시스템은 철도 차량 내부에 탑재되므로 크기와 중량이 제한적이며, 승객들의 안전과 직결되는 주요 부품으로써 높은 신뢰성이 요구되어 다중화 구조 및 고장허용 제어 등을 적용하고 있다.

철도차량 추진시스템에 반도체 변압기 기술을 적용하면 크기 및 중량을 감소시켜 공간 확보 및 축중 감소가 가능하며, 높은 효율을 통해 공공기관의 탄소배출량 저감에 기여 가능하다. 또한 입력 측 인버터의 고조파 및 역률제어 시 철도 전력망 안정화와 운행 시 발생하는 EMI 저감에 효과적이다. 신뢰성 관점에서는 주변압기 소손시 운행이 불가하던 기존 구성에 비해 반도체 변압기는 일부 모듈의 고장 시 고장 모듈을 바이패스하는 고장 허용제어가 가능하여 제한 조건에서 운용 가능하다^[3].

본 논문은 철도차량용 MW급 반도체 변압기 시스템 구성을 위한 모듈의 설계와 실험 결과를 다룬다. 이를 통해 개발된 모듈이 철도차량용 반도체 변압기 시스템 적용에 효과적임을 검증하였다.

2. 반도체 변압기 모듈 개발

2.1 반도체 변압기

2.1.1 시스템 설계

반도체 변압기는 25 kV, 60 Hz 가선 전압을 입력받아 3 kV 직류 전압을 출력하며, 그 사양을 표 1.에 나타내었다. 시스템은 그림 1.과 같이 다수개의 모듈로 구성된 형태를 가지며 각 모듈은 인버터와 절연형 컨버터로 구성된다. 인버터는 직렬로 연결되어 고전압 입력이 가능하도록 설계되었으며, 컨버터는 병렬로 연결되어 1.4 kA의 전류 용량에 대응되도록 설계하였다.

2.1.2 모듈 설계

반도체 변압기 모듈은 1800 Vrms를 입력받아 3 kV 직류 전압을 출력하며 용량은 300 kW로 설계되었다.

입력 측은 고장 허용제어를 위한 바이패스 동작을 위해 AC/DC 인버터의 입력단에 양방향 스위치가 위치하여 비정상 모듈의 입력을 바이패스 시켜 정상 모듈들로만 동작시켜 일부 모듈의 고장 시에도 차량의 운행이 가능하도록 설계되었다. 이 경우, 전체 용량은 단일 모듈의 용량만큼 감소된 약 3.9 MW로 제한된 용량 조건으로 구동된다.

AC/DC 인버터에는 H-브릿지 인버터 토폴로지, DC/DC 컨버터에는 3직렬 구성의 Dual-Active-Bridge(DAB) 토폴로지로 설계되어 추진 전동기의 회생 구동에 대한 양방향 전력제어가 가능하도록 설계되었다. DAB 컨버터의 인덕턴스는 고주파 변압기의 누설 자속으로 구현했으며 그 사양을 표 2에 나타내었다.

모듈의 절연 및 방열은 기존의 주변압기와는 다르게 절연유를 사용하지 않는 형태로 기중절연 및 수냉각 방식으로 설계하였으며 고주파 변압기는 건식 몰드형 변압기로 설계하여 소형 경량화를 만족시켰다.

표 1 반도체 변압기의 사양

Table 1 Specifications of the solid-state transformer

입력 전압	25 kVrms, 60Hz, AC
용량	4.2 MW
출력 전압	3,000 V
구성	14 모듈 구성
효율	> 94%
기능	고장 허용제어 (최대 1모듈 바이패스), 고조파 제어, 역률제어

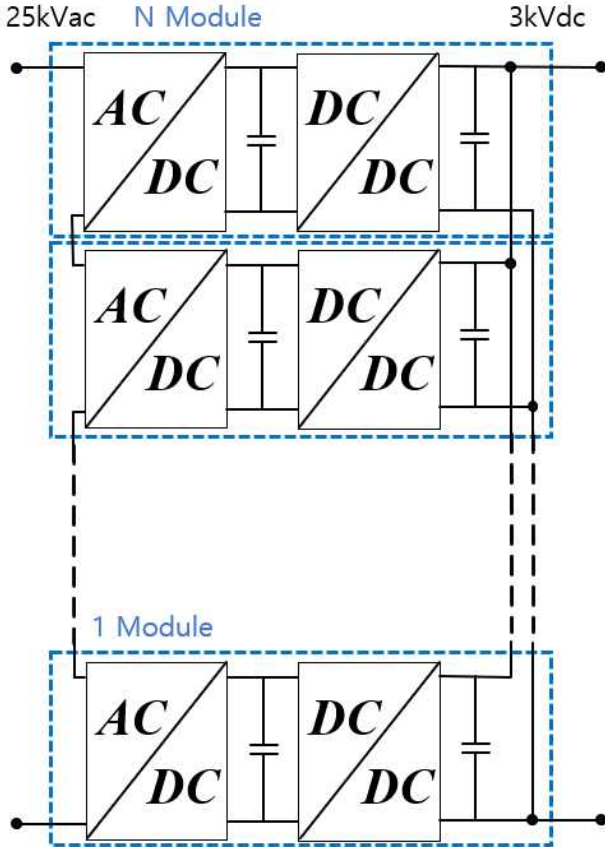


그림 1 철도차량용 반도체 변압기 시스템 구조도
Fig. 1 System configuration of the solid-state transformer

표 2 DC to DC 컨버터의 사양
Table 2 Specifications of the DC to DC Converter

입력 전압	3,000 V (DC)
용량	300 kW
출력 전압	3,000 V (DC)
인덕턴스	30 μ H
스위칭 주파수	30 kHz
구성	DAB 컨버터 3직렬 구성
효율	> 96%

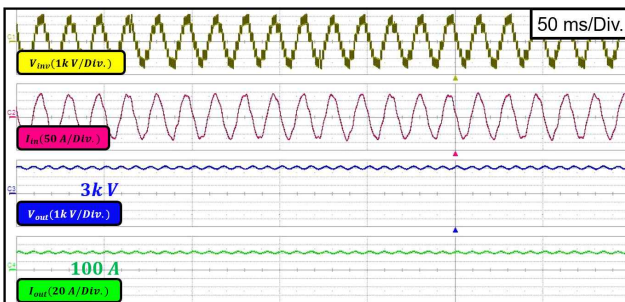


그림 2 모듈의 정격 출력 조건 실험 파형
Fig. 2 Experimental waveforms of the module test under rated output condition

2.2 반도체 변압기 모듈 실험

설계된 모듈의 성능 검증을 위해 실험을 진행하였다. 입력 전압은 6.6 kV 교류 전압을 300 kVA급 변압기를 통해 1800 V 교류 전압으로 강압시켜 사용하였으며 부하는 300 kW급 권선 저항기를 사용하여 성능 검증을 진행하였다.

정격 조건에서의 실험 파형을 그림 2에 나타내었다. 300 kW 출력 및 역률 제어가 됨을 확인하였다. 실험결과 효율은 정격 조건에서 약 96%를 달성했다.

3. 결 론

본 논문에서는 철도차량에 적용하기 위한 4.2 MW 용량의 반도체 변압기 시스템 구성을 위한 단일 모듈을 제안하고 실험을 통해 그 성능을 검증하였다.

요구사항에 따라 철도차량용 반도체 변압기의 시스템 구조를 설계하였다. 입력 측은 직렬로 연결하여 25 kV의 고전압 입력이 가능하며 출력 측은 병렬로 연결하여 1.5 kA의 대전류의 출력이 가능하도록 설계하였다. 각 모듈은 AC/DC 인버터와 DC/DC 컨버터로 구성되며 각 회로의 토폴로지와 그에 따른 사양들이 설계되었다. 최종적으로 정격 용량의 저항 부하 실험을 통해 그 성능이 검증되었다.

추후 후속 연구를 통해 전체 시스템을 구축할 계획이다.

이 논문은 2024년 한국교통대학교 지원을 받아 수행하였음.

참 고 문 헌

- [1] J.W. Kolar, J.E. Huber. "Solid-State-Transformers in future Traction and smart grid systems." in Proc. PCIM 2014 Seminar, Nuremberg, Germany. 2014
- [2] Shamshuddin, M. A., Rojas, F., Cardenas, R., Pereda, J., Diaz, M., and Kennel, R. "Solid state transformers: Concepts, classification, and control." Energies, vol 13, no. 9, 2020.
- [3] E. S. Lee, J. H. Park, M. Y. Kim and J. S. Lee, "High-Efficiency Module Design of Solid-State Transformers for Railway Vehicles," in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 8, no. 1, pp. 98-120, March 2022