

## 한국형 고속전철용 추진제어장치 개발

이광주, 조성준, 우명호, 장성영, 김두식  
현대중공업 기술개발본부 기계전기연구소

### Development of Propulsion System for Korean High Speed Railway

K.J. Lee, S.J. Cho, M.H. Woo, S.Y. Jang, D.S. Kim  
Electro-Mechanical Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.

#### ABSTRACT

This paper introduces the propulsion system for Korean High Speed Railway(HSR). The developed propulsion system consists of PWM AC/DC converter and inverter. Compared with TGV-K, converters can improve input harmonics characteristics by the interlaced PWM switching methods. And several merits such as unity power factor and simple regenerative operations can be also made. As a main power component, IGCT stack with suitable structure for high speed train and environmentally friendly cooling heat pipe is designed. In this paper, overall configuration of controller and control scheme is briefly described. Finally running tests are made to verify the developed propulsion system. The presented test results shows fast torque response, balanced converter current sharing, and appropriate running sequence.

#### 1. 서 론

20세기 이후 산업구조의 분업화와 교역량의 양적인 증대로 인하여 물류 수송의 비중은 점점 더 증가하고 있으며, 대량수송과 수송수단의 고속화를 통한 경쟁력 제고를 위한 각국의 국가적 개발 노력도 매우 활발하게 이루어지고 있다.

G7 고속전철 기술개발 사업은 고속전철을 통한 경쟁력 향상을 도모하기 위해 산·학·연 공동으로 1996년 12월부터 2002년 10월까지 총 6년간 각 3년씩 2단계로 나누어 진행되었으며, 현재 7량의 시제차가 제작되어 KTX 시험구간인 한국고속철도공단 오송 기지에서 각종 시험이 진행중에 있다.

3단계가 진행중인 현재 260km/h 까지 시험을 완

료한 상태에 있으며, 최종목표인 350km/h 속도 증속을 위한 각종 시험이 현재 진행되고 있다.

본 논문에서는 개발된 한국형 고속전철 시스템 중에서 열차 추진에 가장 핵심적인 장치인 추진제어장치의 전력변환회로와 제어기 및 제어 시스템 구성, 그리고 시험선로에서의 주행시험 결과 등이 기술된다. 개발된 추진제어장치의 가장 큰 특징으로는 인버터의 직류전원 공급을 위한 PWM 컨버터의 채용 및 이를 통한 교류 가선측 고조파 오염 및 역률저하 문제의 개선, IGCT(Integrated Gate Commutated Thyristor) 전력소자의 채용, 유도전동기 구동을 위한 전압형 PWM 인버터 채용, 그리고 환경오염 저감을 고려한 Heat-pipe 냉각방식 등을 들 수 있다.

#### 2. 추진제어장치 시스템<sup>[1],[2]</sup>

##### 2.1 전력회로 구성 및 주요사양

###### 2.1.1 컨버터부

개발된 컨버터부는 그림 1에 나타낸 바와 같이 두 대의 단상 승압형(Boost type) 컨버터의 2대 병렬 구조를 가지고 있으며, 교류가선 및 입력측 다권선 변압기를 통해 입력된 1400V 교류전압을 직류 전압 2800V로 제어하는 기능을 수행한다.

병렬 컨버터의 PWM 방식으로는 Interlaced 스위칭 방식이 적용되어 가선 측 전류 고조파의 크기를 대폭 저감하였을 뿐만 아니라 고조파 전류의 주파수 대역을 철도 신호선의 주파수 대역과 중첩되지 않도록 하였다. 또한 PWM 방식 컨버터가 갖는 장점중의 하나인 입력측 단위 역률의 구현, 정현파 전류제어에 의한 입력 변압기에서의 고조파 손실과 소음의 저감 효과, 그리고 열차 제동시 직류측 잉여전력을 가선 측으로 회생(regeneration) 할 수 있도록 하였다.<sup>[3]</sup>

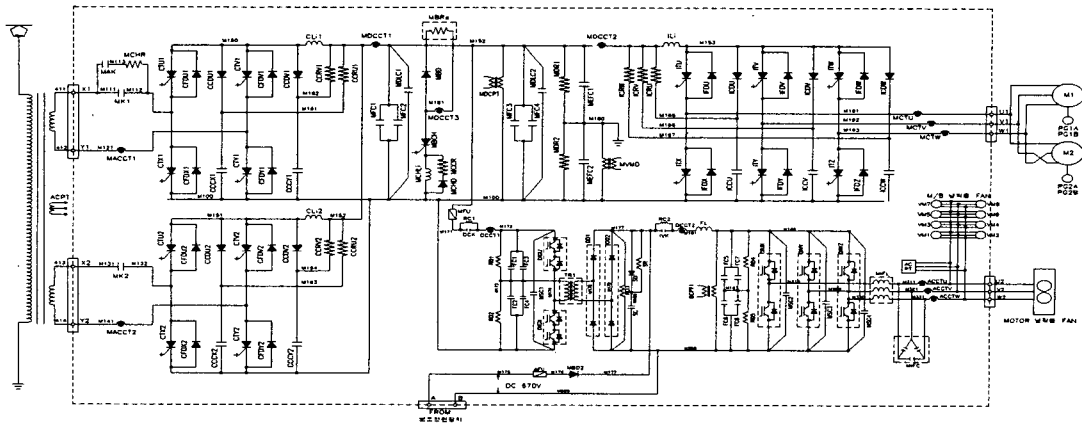


그림 1 추진제어장치 구성도

Fig.1 Circuit diagram of propulsion system

2.1.2 인버터부

인버터부의 전력회로는 그림 1에 나타난 것과 같이 전압형 PWM 방식을 채용하여 두 대의 견인 전동기를 구동하며, 가변전압/가변주파수(VVVF) 제어 방식이 적용되었다. 출력전압과 주파수를 동시에 제어하므로 교류전동기의 가·감속제어가 가능하고 빠른 응답특성을 위해 벡터제어를 수행하며 제동시 교류 전동기에서 인버터로 흐르는 회생전류로 인해 콘덴서 전압이 크게 증가하거나 시스템에 과부하가 걸리는 것을 방지하기 위해 회생전류를 제한하는 기법을 적용하였다. 또한 그림 1의 하단부에는 추진제어장치와 전동기 냉각을 위해 팬 구동하는 별도의 VVVF 인버터가 장착되어 차량의 속도와 추진제어장치의 동작상태에 따라 냉각팬의 회전수를 가변시킨다. 그림 2는 열차 추진 및 상용 제동시의 토크-속도곡선으로 견인력, 인버터 전력, 전동기 전압 전류 등을 나타낸다. 가속도 및

감속도를 만족하기 위해 추진제어장치 1대당 출력해야 할 견인력이고 상용제동시에는 추진시의 80%에 해당하는 제동력을 회생제동으로 발생시키며 잔여 제동력은 공기제동으로 충당한다.

2.1.3 TGV-K와 사양 비교

TGV-K는 표 1에 나타난 것처럼 컨버터부/인버터부 모두 전력소자로는 SCR이 채용되고 있으며, 전류형 인버터에 의해 동기전동기를 구동하는 방식이 채택되고 있다. TGV-K는 정류기 입력단 전류 고조파 성분에 의한 역률 저하 및 가선전압 왜곡 현상 발생, 손실이 매우 큰 직류측 리액터를 사용하여야 하는 등의 단점을 지니고 있다.

표 1 G7 추진제어장치와 TGV-K의 비교  
Table 1 Comparison of propulsion system with TGV-K

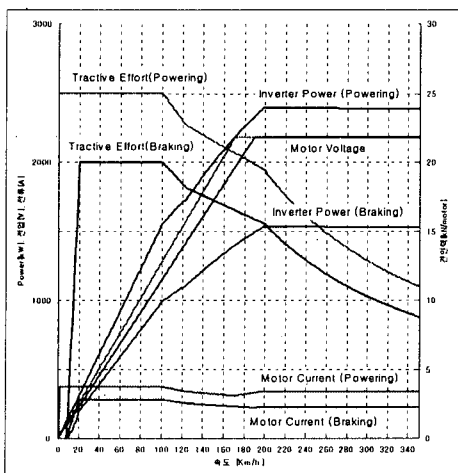


그림 2 속도 토크 특성곡선  
Fig. 2 Speed- Torque Pattern

구분	항목	G7	TGV-K
컨버터부	정류부 방식	PWM 컨버터	SCR 정류기
	전력회로 구성	2× PWM 컨버터	2× Rectifier
	정류기 입력전압	1400Vac	1800Vac
	정류기 용량	2×1300kVA	2×950kVA
	정류기 출력전압	2800Vdc	1500Vdc
인버터부	사용소자	IGCT	SCR
	인버터부	전압형	전류형
	전력회로구성	1×PWM 인버터	2× 전류형 인버터
	인버터 출력전압	2183Vac	1370Vac
	인버터용량	3000kVA	2260kVA
	출력 주파수	0~143Hz	0~196.9Hz
	냉각방식	비등냉각(Heat-pipe)	비등냉각(탱크침적식)
기타	사용소자	IGCT	SCR
	최대속도	350km/h	300km/h
	전동기 형식	유도전동기	동기전동기
	전동기 극수	4극	6극
전동기 회전수	4290 rpm	4000 rpm	

## 2.2 제어기 구성 및 제어 시스템

개발된 추진 제어기의 사진을 그림 3에 나타내었다. 주요 구성부로는 컨버터부와 인버터부의 제어기 카드, 아날로그 및 디지털 I/O 카드, 그리고 TCU(Traction Control Unit) 카드를 들 수 있다. 특히 TCU는 기존 제어기와 달리 C/I 제어기와 통합되는 방식을 사용하였다. 각종 인터페이스 회로를 분리하여 제어기의 상단에 개별 카드로 삽입하게 하여 유지보수 및 결선을 용이하게 하였다.

그림 4은 기본제어 블록도를 나타낸 것으로 차량 운전석으로부터 인가된 정/역 신호, 견인/제동/타행 신호, 요구견인력신호 등이 TCU로 인가되면 TCU-MASTER간의 485 통신을 통해 운전모드지령이 추진제어장치로 전달된다. 추진제어장치의 MASTER 보드는 운행모드, 사구간(Dead Section) 진입여부, 차량신호등을 고려하여 시퀀스 제어를 수행한다. 컨버터부에서는 운전지령에 따라 직류전압제어, 역률제어등을 수행하며 인버터부는 요구견인력에 따라 전동기 토크제어를 수행한다.

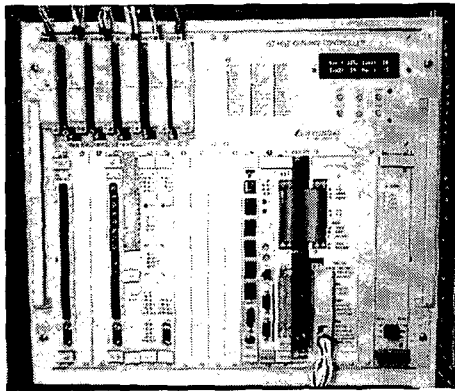


그림 3 개발된 추진제어기

Fig. 3 developed propulsion controller

(4505 Type)으로 개발하여 진동 및 충격에 견디도록 보장하였고 방열과 Noise 문제를 고려하여 4510 Type으로 보완하여 스택 제작에 적용하였다.

Stack은 1 Arm 당 1 Stack으로 구성되어 있으며, Clamp 회로의 Stray Inductance는 IGCT 소자의 Turn-off 전류능력과 밀접한 관계가 있으므로 Clamp 회로를 Stack 내부에서 Busbar로 구성하여 Stray Inductance가 최소화되도록 하였다. Inverter Stack과 Converter Stack은 동일한 방식으로 설계하여 유지보수에 유리하도록 하였다. 그림 5는 IGCT 스택 조립도면이다.

히트파이프는 기존의 CFC의 환경오염으로 인해 국내외에서 개발된 동력제어 반도체용으로 전기절연성이 요구되는 경우 Perfluorocarbon(C6F14)를 작동유체로 사용하고 있으며 진동 및 충격시험에 취약한 부분인 IGCT Stack을 그림 6과 같이 진동에 견디도록 구조 및 고정판을 설계, 취부하였다.

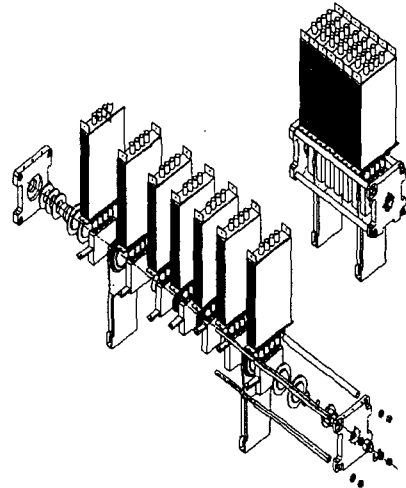


그림 5 IGCT 스택 조립도면

Fig. 5 IGCT stack assembly drawing

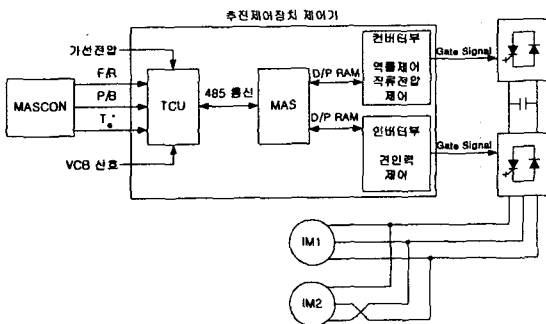


그림 4 제어시스템 블록도

Fig. 4 Block Diagram of Control System

## 2.3 IGCTSTACK

진동에 취약했던 IGCT는 제작업체와 공동으로 기존의 산업용 IGCT(4502 Type)에서 차량용

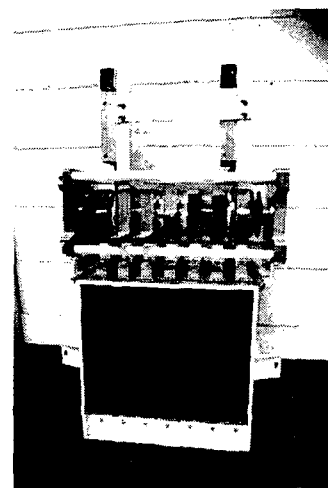


그림 6 완성된 IGCT 스택 사진

Fig. 6 Picture for assembled IGCT stack

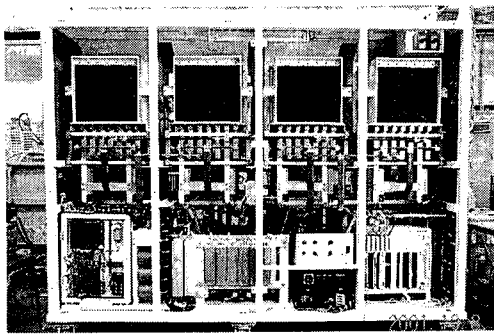


그림 7 추진제어장치(컨버터부)

Fig. 7 Propulsion system(converter part)

### 2.4 추진제어장치

고속전철용 추진제어장치 Panel은 운전과 유지보수에 편리하도록 제작되었다. 각 유닛은 강제 풍 냉식이므로 각 Stack 마다 Fan을 설치하여 주 발열원인인 IGCT와 다이오드에서 발생된 열을 배출해내는 구조로 제작되었으며, 출력단 필터 캐패시터는 최단거리 배선을 위해 Stack 근처에 Busbar로 연결하여 배치하였다. 그림 7은 제작된 추진제어장치의 컨버터부 사진이다.

### 2.5 추진제어장치의 성능시험

추진제어장치의 성능을 검증하기 위한 시험에는 단품 시험, 조합시험, 공장 내 시험 및 주행시험이 있다. 조합시험은 추진제어장치의 시제차 탑재 전 시험으로서 주변압기, 견인전동기, 관성부하와 조합하여 수행되었다. 공장내 시험은 제작된 전장품이 차량에 탑재된 상태로 운전 및 시험을 실시하는 것으로, 납품된 전장품의 동작 유무 및 차량신호와의 인터페이스를 확인하는 것이다.

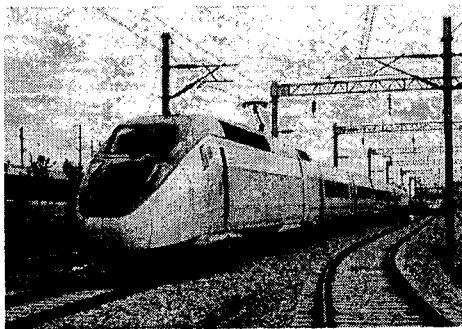


그림 8 시운전 중인 G7 고속전철

Fig. 8 G7 High Speed Railway in field test

그림 8과 같이 동력차 2대, 동력객차 2대, 객차 3대로 1편성을 구성된 시제차량을 본선 시운전 구간으로 이송하여 본선 시운전을 수행하였으며, 본선에서는 50km/h부터 서서히 증속을 하였으며, 각

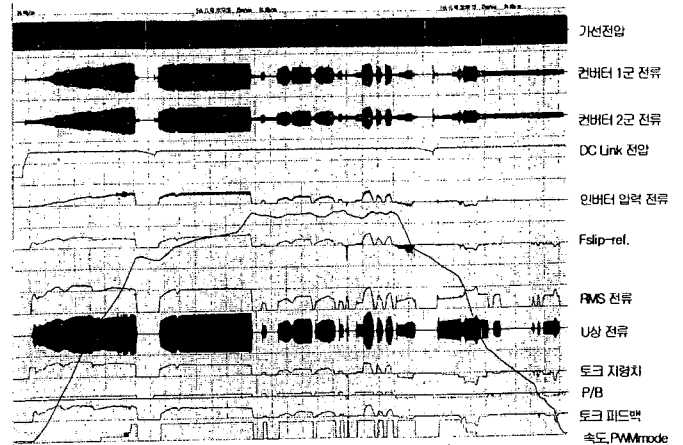


그림 9 최고속도 260km/h 주행시험 파형

Fig.9 Experimental waveform of 260km/h running test

증속 단계마다 가속, 타행 및 감속을 반복하면서 차량의 성능, 안정성 등을 관측하면서 시험을 진행하였다. 그림 9는 최고속도 약 260km/h의 본선 시운전시 가속, 타행, 감속시의 파형을 나타낸 것으로서 개발된 추진제어장치의 제어성을 확인할 수 있다. 가감속시 토크지령에 대해 빠르게 응답하는 것을 알 수 있고, 컨버터부 1, 2군 전류의 분담제어가 되고 있으며 사구간 통과시 타행운전으로 진입하여 동작을 중지하고, 사구간 통과 후 재기동 시퀀스 동작이 원활하게 이루어짐을 알 수 있다.

## 3. 결론

본 논문에서는 한국형 고속전철의 추진제어장치의 전력회로, 제어기 및 제어시스템 구성, 그리고 시험선로에서의 주행시험 결과를 나타내었다.

전력회로 측면에서 볼 때 개발된 추진제어장치는 내진동 구조를 가진 IGCT 스택의 설계, 환경친화적 냉각방식 등의 적용, 추진제어장치의 구조 설계 및 제작 기술을 확보할 수 있었으며, 시험 주행선로에서의 단계적인 증속 시험을 통해 최종 증속 목표인 350km/h의 안정적인 운행에 필요한 시스템 운영기술과 인버터 제어 요소기술을 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

이 논문은 건설교통부와 산업자원부 및 과학기술부에서 시행한 선도기술개발사업의 기술개발 결과임

## 참고 문헌

- [1] 기계전기연구소 전력변환연구실 “주전력변환장치개발” 현대중공업(주) 1단계 완료보고서, 1999.10.
- [2] 기계전기연구소 전력변환연구실 “주전력변환장치개발” 현대중공업(주) 2단계 완료보고서, 2002.10.
- [3] 이현원, 장성영, 김연준, 이광주, “IGCT를 이용한 단상 PWM 정류기 병렬운전”, 전력전자학회 논문지, Vol. 5, No. 1, pp. 11~18, 2000, 2.