

고속철도차량 전류제어형 추진제어장치 개발을 위한 조사분석

Research and analysis for current-controlled type propulsion control device of high-speed railway vehicles

박상운† 윤차중* 이영호**
Sang-Woon Park Cha-Jung Yun Young-Ho Lee

ABSTRACT

The TBO of main unit of propulsion control devices on high-speed railway vehicles proposed by the makers is appropriated 10 years cycle, but the maintenance of internal device are proceeding before coming to the particular period of time. In the Future, increasing of the failure probability occurred by increasing train service and obtaining spare parts are predicted that it would be difficult. the propulsion control devices develop is needed in other to the ease maintenance, cost savings and ensuring related domestic technologies when considering operating on long term of high-speed railway vehicles.

In this paper, we proposed development a way that current-controlled type propulsion control devices using the newest power semiconductors which is easy to supply and demand through identifying performance and characteristics of existing current-controlled type propulsion control devices of high-speed railway vehicles.

1. 서 론

고속철도 개통 이후 추진제어장치에 대한 주요 핵심부품의 해외 의존도가 높고 부품 확보에 어려움이 발생되고 있다. 대부분 유지보수에 사용되는 핵심 부품이 해외에서 수입되고 있는 실정이다.

고속철도차량 추진제어 주요장치의 제작사에서 제시한 TBO주기는 10년으로 책정되어 있으나 그 기간이 도래하기 전에도 내부 장치의 유지보수가 진행되고 있으며 앞으로 운행증가에 따른 고장 확률의 증가와 예비부품의 확보가 어려워 질 것으로 예측된다. 장기간의 고속철도차량 운영기간을 고려할 때 유지보수의 편이성, 비용절감 및 관련 국내기술 확보를 위하여 추진제어장치의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 기존 고속철도차량 전류제어형 추진제어장치의 성능 및 특성을 파악하고 이를 통해 수급이 용이한 최신 전력용 반도체 소자를 사용한 전류제어형 추진제어장치를 구성하는 일부장치들의 개발 방향을 제시하고자 한다. 본 연구는 한국고속철도차량(KTX)에 한하여 기술한다.

2. 본 문

2.1 고속철도차량 추진제어장치의 개요

고속철도차량은 견인방식이 동력 집중방식으로 GTO, Thyristor 반도체 소자를 제어하여 교류 동기 전동기를 구동한다. 현재 세계적 철도기술 연구개발에 비추어 볼 때 이러한 추진제어 방식은 비동기인 유도

† 책임저자 : 비회원, 한국철도공사, 주임연구원
E-mail : kacdooki@korail.com
TEL : (042)615-4718 FAX : (02)361-8542
* 비회원, 한국철도공사, 차장
** 비회원, (주)우진산전, 팀장

전동기를 적용하고 있는 독일, 일본 등과 달리 동기전동기로 적용함에 따른 제어방식이 상이하고 반도체 소자나 컴퓨터 제어기술이 첨단 디지털보다는 아날로그 제어방식에 가까운 형태로 제작되어 부품조달 및 국산화시 생산에 제한적인 요인으로 작용되고 있다.

각 나라마다 차이는 있으나 추진제어장치에 GTO 대신 고속 스위칭이 가능한 IGBT를 선호하는 추세이기 때문에 기존 부품 구입에 많은 차질이 예상되리라고 보며, 구입시 가격대비 유지보수에 막대한 비용이 소요 될 것으로 판단된다. 따라서 고속철도차량의 안정적인 운행, 원활한 유지보수 및 비용절감을 위해서는 추진제어장치의 수입부품의 단종 또는 TBO가 도래하기전에 최신반도체소자(대용량 IGBT)를 적용하여 추진제어장치를 국산화 개발하는 것이 필연적이라고 사료된다. 이를 위해서는 컨버터/인버터 장치와 이의 냉각장치, 적절한 제어 알고리즘, 장치 간 인터페이스 기능 등 여러 방면에서 다양한 연구가 추진되어야 한다. 또한 국내 고속전철의 활성화 및 세계시장에 접근하기 위해서는 고속철도차량의 추진제어장치(Motor Block)의 원천 기술 확보는 무엇보다 우선되어야 할 것으로 본다.

2.2 고속철도차량 추진제어장치의 TBO

한국고속철도차량은 한 편성당 추진제어장치는 6대이다. 차량의 TBO는 20년이고 그 중 추진제어 주요장치의 제작사에서 제시한 TBO는 표 1과 같다.

표 1. 고속철도차량 추진제어장치의 제작사에서 제시한 TBO

부 품 명	부품분해 수선주기	TBO
견인 컨버터(CV-TT)	10년	10년
견인 인버터(IR-TT)	10년	10년
여자초퍼(CO-EX)	10년	10년
제동초퍼(CO-BK)	10년	10년
역률개선장치(CV-PFC)	10년	10년
격자저항(ZB-BK)	3Mkms	7년
각종 제어 카드	5년	5년

2.3 고속철도차량 추진제어장치의 구성과 특징

고속철도차량의 추진제어 주요장치는 그림 1과 같이 2개의 역률개선 회로(P.F.C), 2개의 컨버터, 1개의 평활리액터, 2개의 전류형 인버터, 2대의 3상 동기전동기부, 1개의 여자초퍼부로 구성되며 냉각방식은 침적식 냉각방식이 사용된다.

- (1) 역률개선회로(CV-PFC)는 주변압기 2차권선에 유도된 전원의 고주파 전류 및 전류와 전압의 위상차를 개선시키고, 60Hz의 제 3고주파인 180Hz를 필터링하여 사인파에 가까운 파형을 견인컨버터에 공급한다.
- (2) 컨버터(CV-TT)는 사이리스트와 리액터의 조합으로 구성되며 주 변압기 2차권선의 AC 1800V를 정류함과 동시에 인버터로 공급되는 견인전류(출력전류)를 조절한다.
- (3) 평활리액터(L-SM)는 컨버터에서 정류된 직류전원을 필터링하고, 인버터에 공급되는 전류의 갑작스러운 변화를 막아준다.
- (4) 전류형 인버터(IR-TT)는 컨버터에서 공급되는 견인전류를 견인전동기의 고정자권선에 공급하여 3상 교류전원을 만들어 낸다. 인버터는 전류원인 직류부에서 교류로 변환하는 것으로 즉응성이 우수하고 전원에 에너지를 회생할 수 있는 등 고성능 기종에 적합한 인버터이다. 부하 즉, 제어되는 측에서 보아 Inverter가 전류원인 것은 전류형이라 부른다. 전류형 Inverter는 직류측에 대용량 Reactor가 접속된다. 이것에 의해 출력전류는 항상 일정방향으로 흐르고 파형도 방형파가 된다. 반도체 소자에 역병렬 Diode 접속은 필요 없는데 부하 Inductance의 축적에너지를 흡수/방출하는 회로가

필요하다. 일반적으로 출력측에 Condenser가 접속된다. 전류형 Inverter에서는 Arm 단락 등에 의한 과전류발생 가능성은 낮는데 Inverter Off에 의한 전압이 Spike상의 과형을 포함하게 되므로 사용되는 소자는 높은 과전압 내력을 필요로 한다. 전류형 인버터의 특징은 표 2와 같다.

- (5) 여자초퍼(CO-EX)는 보조컨버터(혼합브리지)로부터 DC 570V 전원을 공급받아 직류 출력전원을 조절하여 직렬로 연결된 2개의 견인전동기 회전자 권선에 공급한다. 발전제동 모드에서는 배터리 전압을 입력전원으로 이용할 수 있다. 여자초퍼 전류의 결정은 모터블록 전자제어장치에 의해 이루어진다.

표 2. 전류형 인버터의 특징

전류형 인버터	
출력 임피던스	크다
응답성	나쁨
발열	높음
입력역율	나쁨
과부하 내량	크다
단락 보호	간단
토크리플	크다
최고주파수	높음
적용성	대형 중량
소음	작음
무부하 운전	불가능
주회로 소자의 내압	높음
대용량화	가능
적용차량	TGV-A, KTX

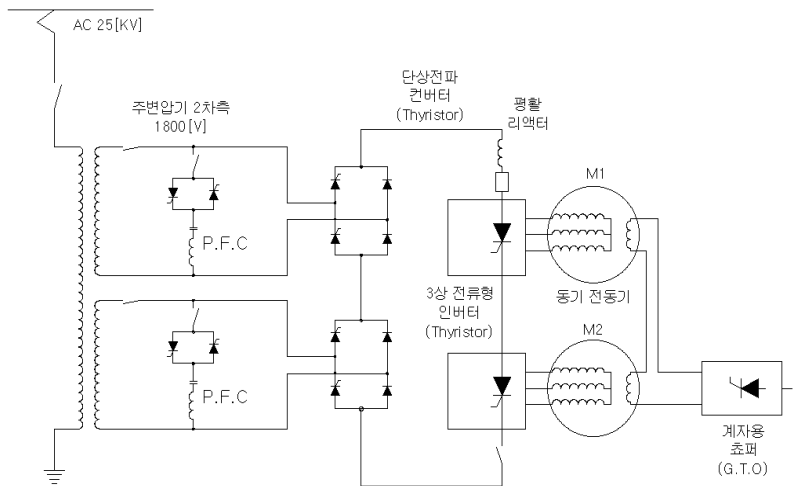


그림 1. 고속철도차량 전류형 추진제어장치 구성

그림 2는 MATLAB/SIMULINK를 이용한 3상 인버터의 시뮬레이션 블록도를 보여준다. 여기에는 3상 인버터 블록과 입력전원, 역기전력을 고려한 3상 전원, 인버터 위상제어를 위한 게이트펄스 발생기 등으로 구성되어 있다.

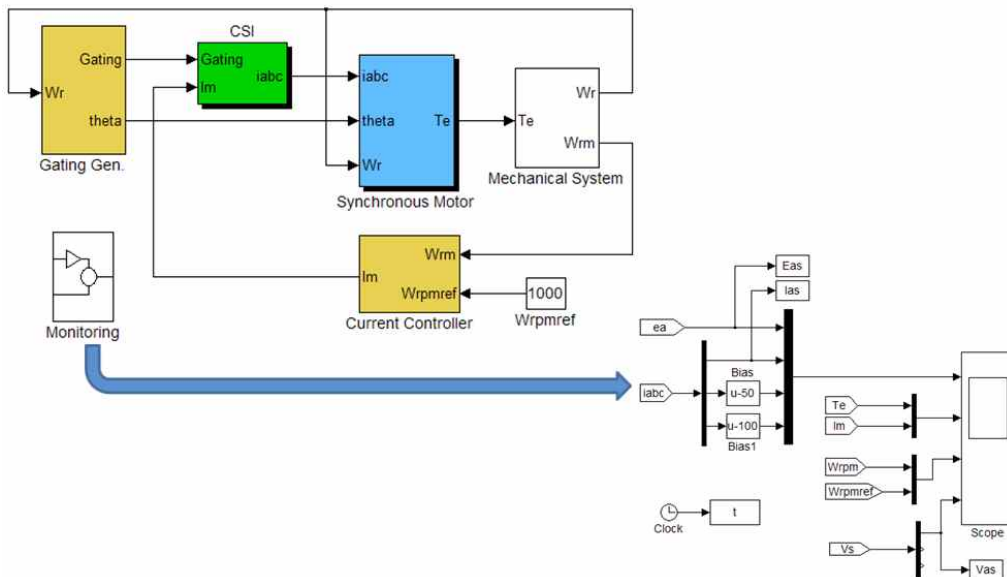


그림 2. MATLAB/SIMULINK를 이용한 시뮬레이션

그림 3은 상기 시뮬레이션의 결과로서 출력전압, 출력전류 등의 시뮬레이션 값을 보여준다.

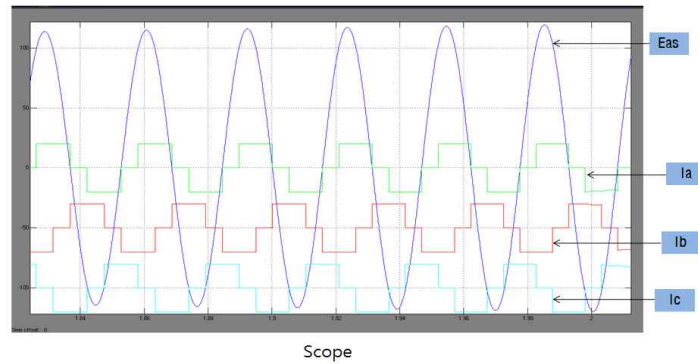


그림 3. MATLAB/SIMULINK를 이용한 시뮬레이션 결과

2.4 추진제어장치 주회로 소자 비교

추진제어장치의 주회로 소자는 현재 Thyristor와 GTO를 사용하고 있으며, 본 논문에서는 표3과 같이 Thyristor, GTO, IGBT를 비교하였다.

Thyristor의 경우 전압과 전류의 내량이 크지만, 스위칭 주파수가 낮은 단점이 있고, GTO의 경우 전압 전류의 내량이 크고 대용량 장치에 사용이 용이하지만, 스위칭 주파수가 낮아 출력파형이 깨끗하지 못한 편이며, 스너버 회로가 필요하여 스위칭 손실이 크다. 이에 비하여 IGBT는 소자 양면냉각으로 냉각 성능이 우수하며, 고속 스위칭을 통한 스위칭 소음 저감 및 출력파형이 깨끗하며, 소자 교환이 쉬운 편이지만, 서지에 대한 내량이 적으며, IGBT Stack의 중량이 무거운 단점이 있다.

표 3. 스위칭 소자 비교

구분	THYRISTOR	GTO	IGBT	
			PPI	MODULE
정격	4200V, 2536A	4500V, 3000A	3,300V 1,200A	3,300V 1,200A
소자이름	Phase Control Thyristor	Gate Turn Off Thyristor	Insulated Gate Bipolar Transistor	Insulated Gate Bipolar Transistor
소자구성	위상제어 Thyristor	자기소호형 Thyristor	FET+Transistor	FET+Transistor
스위칭주파수	100Hz	500Hz	2kHz	2kHz
구동방식	전류구동형	전류구동형	전압구동형	전압구동형
Gate구동회로	소형	대형	소형	소형
전력손실	많음(100%)	많음(100%)	적음(80%)	적음(80%)
소자타입	압접타입	압접타입	압접타입	칩본딩타입
서지내량	큼	큼	적음	적음
장·단점	<ul style="list-style-type: none"> - 전압 및 전류 내량이 큼 - 스위칭 주파수가 낮음 	<ul style="list-style-type: none"> - 전압 및 전류 내량이 큼 - 대용량 장치에 사용용이 - 낮은 ON상태 손실 - 스위칭 주파수가 낮아 출력 파형이 깨끗하지 않음 - 스너버 회로가 필요하고 이에 따른 스위칭 손실이 큼 - 드라이브 회로가 복잡하고, 전력손실이 큼 - 전류구동회로이므로 게이트회로가 큼 	<ul style="list-style-type: none"> - 소자 양면냉각으로 냉각 성능이 우수 - 고속 스위칭을 통한 스위칭 소음 저감 및 출력 파형이 깨끗함 - 전압구동방식으로 제어가 용이함 - 구동 신호의 피드백으로 소자 단락방지가 쉬움 - IGBT Stack조립시 전용의 압접기가 필요함 - 냉각 장치의 수량이 증가하는 경향이 있음 - 서지에 대한 내량이 적음 	<ul style="list-style-type: none"> - IGBT Stack의 조립이 간단함 - 냉각 장치가 단순함 - 소자의 교환이 간단함 - 소자 단면냉각으로 냉각 성능이 떨어짐 - IGBT Stack의 중량이 무거움 - GTO에 비해 전압 및 전류 내량이 적어 인버터의 소자 수량은 동일하지만 컨버터의 소자 수량은 증가하는 경향이 있음 - 서지에 대한 내량이 적음

2.5 추진제어장치 냉각방식 비교

추진제어장치의 냉각방식으로는 탱크침적비등냉각, 개별비등냉각, Heat Pipe 냉각 등으로 나눌 수 있다. 현재 고속철도차량은 탱크침적비등냉각 방식을 사용하고 있으며, 탱크침적비등냉각 방식의 냉각성능은 대용량의 냉각장치에 용이하고, 소형 설계가 가능하며, 절연냉매에서 절연확보가 가능하고, 액침적형이므로 기밀 개방하여 교환하여야 하므로 유지보수성이 좋지 않다. 또한 개별비등냉각 방식은 냉매로의 열전송이 침적식 보다 적으며, 탱크침적형보다 소형화가 가능하고, 액침적형이므로 기밀 개방하여 교환하여야 하므로 유지보수성이 좋지 않다. Heat Pipe 냉각 방식의 경우 냉매로의 열전송이 탱크침적형보다 적으며, 탱크침적형보다 부피가 커지고 Heat Pipe의 일부에 애자관을 배치하여 절연확보를 하여야 하며, 방진기구관을 개방하여 교환이 가능하므로 탱크침적비등냉각 방식과 개별비등냉각 방식보다는 유지보수가 용이하다.

표 4. 냉각방식 비교

구분	탱크침적비등냉각	개별비등냉각	Heat Pipe 냉각
냉각액	프레온 카본계 (FC-72)	프레온 카본계 (FC-72)	프레온 카본계 (FC-72)
냉각성능	대용량 냉각장치에 용이	냉매로의 열전송이 침적식보다 적음	냉매로의 열전송이 침적식보다 적음
유지보수성	어려움	어려움	용이
Stack 절연	절연냉매에서 절연확보	절연냉매에서 절연확보	Heat Pipe의 일부에 애자관을 배치하여 절연확보
구조의 용이성	소형 설계 가능	탱크침적형보다 소형화 가능	탱크침적형보다 부피가 커짐
종합평가	기밀 구조체가 중량이 크게 된다. 비프레온화도 가능하지만 액량이 상당히 많음	기밀 구조체가 중량이 크게 된다. 비프레온화도 가능하지만 액량이 상당히 많음	자연냉각과 강제냉각으로 구분되어 사용되고 있으며, 구조가 단순하여 보수가 용함

침적냉각방식의 열해석 결과 살펴보면 CUBE 내부에 냉매(FC-72)가 없을 때 다이오드 온도가 97.3℃(40℃일때), 81.3℃(24℃일때)로 확인되었고, 냉매가 들어 있을때 다이오드 온도가 65.5℃(40℃일때), 47.0℃(24℃일때)로 낮아짐을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다.

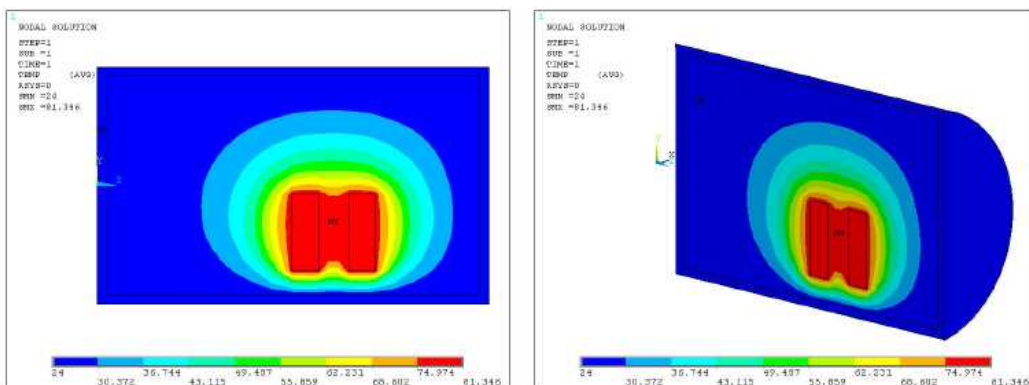


그림 4. 냉매를 사용하지 않은 경우의 다이오드 온도(주위 온도 24℃)

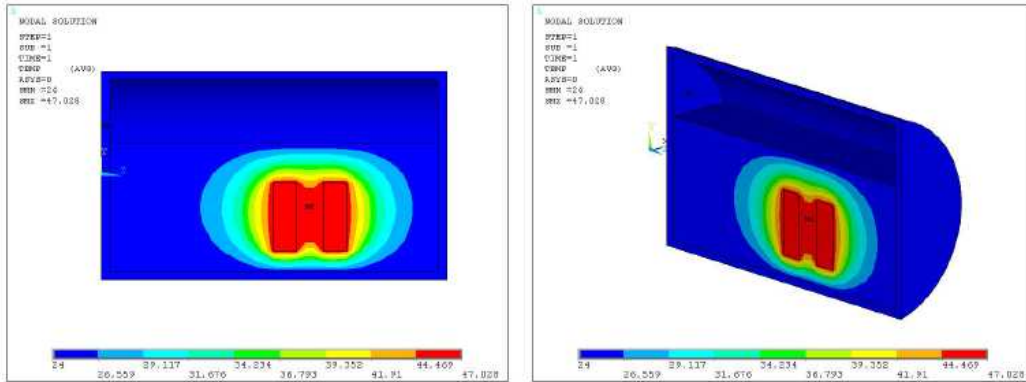


그림 5. 냉매(FC-72)를 사용한 경우의 다이오드 온도(주위 온도 24℃)

3. 결 론

본 논문에서는 고속철도차량용 추진제어장치의 개발을 위해 자료를 분석 및 해석하기 위하여 추진제어 주요장치의 TBO주기, 특성 및 기능을 분석하였다. 고속철도차량 추진제어장치의 전류형 인버터 성능을 분석하기 위해 전류형 인버터 성능을 시뮬레이션과 탱크침적비등냉각방식의 열해석을 수행하여 추진제어 주요장치에 대하여 최신 반도체소자를 이용하고 발전된 기술을 접목하여, 기존 KTX의 추진제어장치를 한단계 발전시킬 수 있는 개발방향에 대하여 조사 분석을 통해 제시하였고, 현재 국토해양부의 지원을 받아 연구수행 중인 고속철도차량(KTX)의 추진제어장치 국산화 개발시 설계에 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 향후 시제품 제작 및 현차 적용시험을 위해서는 좀더 심도있는 조사분석과 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2009년도 국토해양부 및 한국건설교통기술평가원의 지원을 받아 연구되어지고 있는 미래철도기술개발의 “R&D/10PRTX-C051915-02 연구과제로써 관계부처 및 관계자 분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. 국토해양부, 최신반도체 소자를 이용한 고속철도차량용 추진제어 기술개발, 2010
2. “The SIMULINK User's Guide“ in Mathworks Handbook. Math Works. 1994.
3. “고속전철 추진시스템의 전력변환장치” KSR 9906 pp.39~45, 1999.
4. B. K. Bose, 1986, “POWER ELECTRONICS AND DRIVES“
5. Venkatachari 1987, Rajagopalan, “Computer Aided Analysis of Power Electronic Systems“
6. 설승기, “전기기기제어론”, BRAIN KOREA, 2002. pp. 299-352
7. “Analysis of a Novel Forced-Commutation Starting Scheme for a Load-Commutated Synchronous Motor Drive“ IEEE Vol IA-15, NO.1, 1979
8. “Characteristics of a Current-Fed Inverter with Commutation Applied Through Load Neutral Point" IEEE Vol IA-15, NO.5, 1979
9. 이은규, 이영호, 송영신, 권선범(2009) “고속철도(KTX) 차량용 추진제어장치의 전력변환장치 연구” 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.361
10. 건설교통부, 철도기술연구개발사업 추진제어장치 실용기술개발 I, 2007