

TTX 전기차량 추진제어시스템에 관한 연구

\*이수길, 한성호, 송용수, 한영재, <sup>o</sup>이은규  
 한국철도기술연구원 기존철도기술개발사업단, <sup>o</sup>우진산전

The Study of Propulsion System for TTX(Tilting Train eXpress) EMU

Su-Gil Lee, Seong-Ho Han, Yong-Soo Song, Young-Jae Han, <sup>o</sup>Eun-Kyu Lee  
 Korea Railroad Research Institute, <sup>o</sup>WooJin Co. Ltd

**Abstract** - 인구가 증가하면서 인간의 생활활동 범위가 증가되었고 이에 따라 운송시스템에 대한 수요가 크게 증대되고 있다. 그러나 물류 이동에 필요한 여러 가지 제반 시설은 이를 충족시키지 못하고 있으며, 이로 인하여 현재 국내의 물류수송효율은 최악의 상황에 직면해있다. 이로써 대용량의 수송능력을 담당하는 철도차량 운송 시스템에 대한 수요가 급증하게 되었다. 따라서 이에 대비하고자 많은 신규 노선을 계획하고, 이와 함께 신설되는 노선에 대해서는 시스템 운영 효율의 극대화를 위해 노선별로 고속전철과 지하철, 경전철, 틸팅차량, 그리고 자기부상열차 시스템 등 여러 가지 방식이 검토 중에 있으며 차량에 가장 적합한 추진시스템을 설계하는 것이 차량의 성능에 크게 향상시킬 수 있다.

1. 서 론

추진 및 제어시스템은 철도차량의 핵심 전장품으로 컨버터/인버터, 견인전동기 및 주변압기로 구성되어 있다. 종래 전동차의 대표적인 구동방식은 제어방식에 따라 저항 제어방식과 chopper제어방식, VVVF인버터 제어방식이 있다. 견인전동기는 높은 견인력과 속도특성이 요구되며 이 특성에 적합하도록 제어하기 위해서는 견인전동기 특성에 따라 다양한 제어시스템이 사용되어왔다. 전동기를 제어하기 위한 제어시스템은 전력반도체 소자의 발달과 함께 발전해왔다. 1970년대에는 반도체소자의 발달이 늦어 차량속도제어방식은 저항을 이용한 저항제어방식이 주류를 이루어왔다. 1980년대에는 에너지 절감과 승차감 향상에 뛰어난 Chopper제어시스템을 도입하였다. 이 시스템은 차량기술발전 측면에서 진일보한 시대였음에는 틀림없으나 차량용 견인장치가 직류전동기였기 때문에 정류에 필요한 부품 등의 사후관리 비용, Flashover 등에 의한 시스템 안정에 많은 문제점을 가지고 있었다. 1980년대 말부터 고전압, 대용량 급의 역도통 GTO Thyristor소자가 개발되면서 유도전동기를 전동차에 사용할 수 있게 되었으며, 1990년대 초부터 우리나라에도 지하철 전동차에 대량으로 유도전동기가 적용되기 시작하였다.

유도전동기는 정류자가 없어 유지보수가 거의 필요 없고 같은 용량의 전동기라 해도 훨씬 작고 가벼운 장점을 가지고 있다. 그러나 유도전동기는 직류전동기에 비해 기동토크가 작아 사용에 어려움이 있었다. 최근 들어 전력반도체 소자의 발달로 인하여 견인전동기에 VVVF인버터 제어방식을 적용함으로써 유도전동기의 적용이 가능하도록 하였다. 우리나라의 전동차제어방식은 고전압, 대용량 역도통 GTO Thyristor를 사용한 VVVF인버터 제어시스템의 집중제어방식(1C4M)방식이 사용되어왔다. 그러나 최근 급격한 반도체 기술(power electronics and micro electronics) 발달에 힘입어 고속스위칭이 가능한 IGBT 등의 MOS게이트 소자가 기존의 소자를 대체할 수 있는 새로운 소자로 주목받고 있으며, 최근 제작되거나 발주 예정

인 전동차는 대부분 IGBT소자를 채용하도록 하고 있다. 열차추진성능은 시스템 요구사항을 만족해야 하며, 최고 운행속도 180km/h의 주행이 가능해야하고, 최고운행속도에서 0.07m/s<sup>2</sup>이상의 여유가속도를 확보해야 하며, 단 7% 이상의 오름 구배를 주행할 수 있어야 한다. 이를 위해 충분한 열차 추진력을 확보할 수 있는 견인전동기 성능을 갖출 수 있도록 시스템이 설계되어야 한다.

- 1) 열차속도 : - 최고운행속도 : 180 km/h  
 - 설계최고속도 : 200 km/h
- 2) 편성 :  
 - 시제편성(6량) : Mcp+M+T1+T2+M+Mcp  
 - 확대편성(9량) :  
 Mcp+M+T1+M+M+T1+T2+M+Mcp

여기서 Mcp : 제어구동차차 (Motorized Control Car with Tilting Pantograph)  
 M : 구동차 (Motorized Car)  
 T1, T2 : 부수차(Trailer)

- 3) 열차중량(W2) : 기본편성 344톤 이하  
 9량 확대편성 516 톤 이하
- 4) 추진성능 : 상용최고 속도 시 0.07% 이상의 여유가속도를 가지거나 또는 7% 이상의 구배를 주행할 수 있어야 한다.
- 5) 차륜경 : 신차륜 860 mm  
 성능계산 820 mm(반마모)
- 6) 주행저항

주행저항을 산출하기 위하여 철도청 디젤동차 주행저항식을 차량시스템 엔지니어링 기초연구를 수행하기 위하여 다음과 같이 철도청 디젤동차식을 사용하였다.  
 $R(Kg) = A + B \times V + C \times V^2$   
 $= 2.5 + 0.0186 \times V + \{(0.0269 + 0.0079(n-1)) \times V^2\} / W$   
 여기서 A : 2.5, B=0.0186×V, C =  
 $\{(0.0269 + 0.0079(n-1)) \times V^2\} / W,$   
 W : W2(normal load, Kg),  
 V : 열차속도(Km/h), n= 차량 수

주행저항식은 개발되는 기존선 고속 틸팅열차의 추진 및 제어시스템의 연구를 위하여 사용하여 연구를 수행하고 TTX 차량의 시제차를 제작하여 시운전 시험을 통하여 새로운 주행저항식이 정의될 것이다.

2. 본 론

2.1 추진제어장치 역행성능

개발되는 기존선 고속 틸팅 열차의 열차의 추진 시스템은 3량 단위로 유니트화 시켰으며, 이는 열차의 유연성을 부여하고, 추진 시스템을 Simple(간략화)하게 하기 위하여 시스템이 검토 선정되어 추진하고 있다. 현재 운영되고 있는 추진 시스템의 제어 방식은 IMIC 방식, 2MIC 방식, 4MIC 방식 등 다양하다. 틸팅 시스템의 기술도입의 방향에 따라 2MIC 방식 또는 4MIC 방식으로 검토되겠지만,

현재 검토된 것은 2MIC 방으로 연구하고 있다. 1MIC 제어방식은 구동차 1량에 추진 시스템 일체를 설비하는 방식으로 1량에 견인전동기, 주전력변환장치, 판토타그래프, 보조전원장치, 제어장치, 제동/공압장치 등을 설비한다. 2MIC 제어방식은 구동차와 비구동차 각 1량을 1Unit로 추진 시스템을 구성방식으로 M차에는 견인전동기, 주전력변환장치를 설비하고, 부수차(T)에는 판토타그래프, 보조전원장치, 제동 및 공압장치, 제어장치를 설비하게 된다.

4MIC 제어방식은 구동차 2량과 비구동차 1량을 1Unit로 추진 시스템을 구성하는 방식으로 M차에는 견인전동기, 주전력변환장치를 설비하고, T차에는 판토타그래프, 보조전원장치, 제동/공압장치, 제어장치를 설비한다.

- 역행 성능 계산

이 계산은 일반 전동차에 비해 비례 증고속 차량인 킬링 차량의 열차성능계산식이다.

기동 견인력은 66 km/h 속도에 도달할때까지의 평균가속도 2.0 km/h/s 를 얻기위한 견인력은 다음과 같이 계산한다.

① 60 km/h (0 ~ 35 km/h간 평균 가속도)에서의 주행저항  $R = (2.5 + 0.0186 \times 60) \times 344 + ((0.0269 + 0.0079 \times 79 \times 5) \times 602)$  이고

② 관성계수 동력차 : 14% 부수차 : 6%

③ 견인력

$$28.35 \times (W_{\text{tota}} + W_m \times 0.14 + W_t \times 0.06) \times a + Fr$$

$$28.35 \times (344 + 198 \times 0.14 + 92 \times 0.06) \times 2 + 1483 = 23,200 \text{ kgf}$$

중간속도 영역의 역행성능은 정토크 중단 속도를 65km/h로 하면, 이때의 출력은 다음과 같이 계산하였다.

$$(23,200 \text{ kgf} \times 65 \text{ km/h}) / 367.2 = 4,106 \text{ Kw}$$

정전력 영역의 중단속도를 55km/h로 가정하면, 견인력은 다음과 같이 계산하였다.

$$4,106 \text{ kW} \times 367.2 / 165 \text{ km/h} = 9138 \text{ kgf}$$

고속영역에서의 견인력은 최대속도 200km/h에서의 주행저항은 4,796 Kgf이다. 200 km/h에서 견인력은 아래 수식에 의해 계산되어 6,220Kgf 이다. 이때 0.15 km/h/s 가속여유를 제공한다.

$$9,138 \text{ Kgf} \times (65 \text{ km/h})^2 / (200 \text{ km/h})^2 = 6,220 \text{ Kgf}$$

또한 운영최대속도 180km/h에서 0.33km/h/s의 가속여유가 있다. 구배 기동 가속도는 견인력은 23,200 Kgf이고, 60 km/h의 주행저항을 사용해서, 최대구배 35%의 가속도를 계산한다.

$$[23,200 - (35 \times 344 + 1483)] / (344 \times 28.35 \times 1.101) = 0.98 \text{ Km/h}$$

정격속도와 견인력을 전차의 표정속도와 운영 최대속력 180 Km/h를 고려하여 정격 속도를 60Km/h로 한다. 견인전동기의 정격출력은 사양에 따라 250KW로 한다. 따라서 견인전동기의 축단 정격견인력을 계산하면 다음과 같다.

$$250 \text{ kw} \times 367.2 / 60 \text{ Km/h} = 1,530 \text{ Kgf} \text{ (전동기 1대당)}$$

견인전동기 최대 동차 회전수는 최고속도 200Km/h에서 차를 최대 마모조건 일때에 치차비 91/22, 적용하여 견인전동기의 회전수를 계산하면 다음과 같다.

$$(200 \text{ km/h} \times 91/22) / (0.1885 \times 0.78 \text{ m}) = 5,626 \text{ rpm}$$

비상운전에 있어서의 구배 기동가속도는 열차편성 4M2T에 있어서 1M차 개방조건으로 60km/h의 주행저항을 사용하여 최대구배 35%의 기동가속도를 계산하면 다음과 같다.

$$[23,200 \times 3/4 - (344 \times 35 + 1483)] / (31.2 \times 344) = 0.4 \text{ Km/h/s}$$

비상운전 조건에서의 운전은 6량편성열차는 만차하중(W2) 상태에서 7/8동력으로 속도180km/h의 주행이 가능해야한다. 6량편성열차는 만차하중(W2) 상태에서 3/4 동력으로 3.5%상구배에서 출발이 가능해야한다. 9량,12량 편성시 최대승객하중에서 1유닛 개방으로 3.5%상구배에서 출발이 가능해야한다.

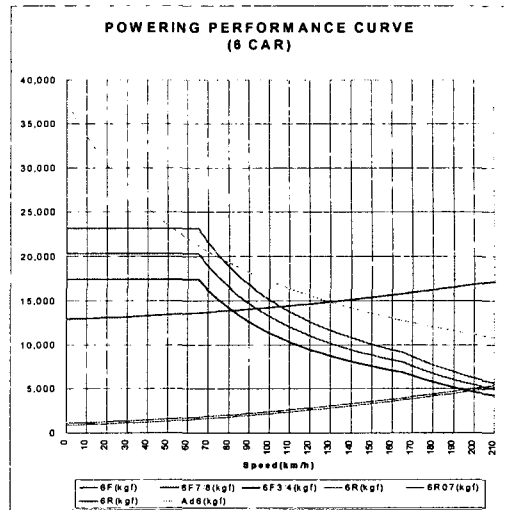


그림 1. TTX 차량 견인특성곡선(6량편성)

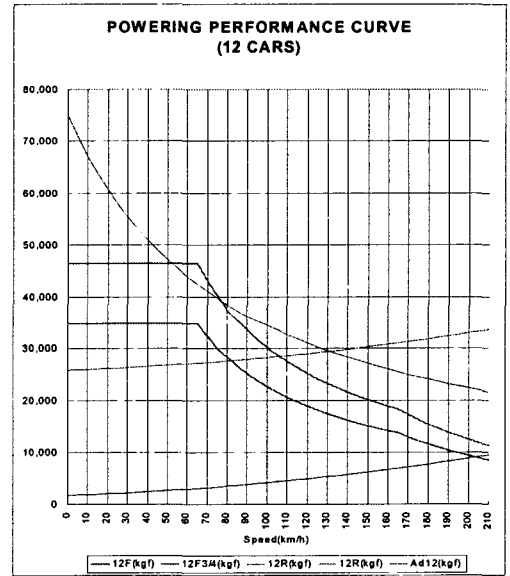


그림 2. TTX 차량 견인특성곡선(12량편성)

2.2 추진제어장치 제동성능

총편성 증량은 344 ton이고, 차량의 제동력은 전기 제동력 기계 제동력으로 구분을 하지만 차량의 추진제어장치에서 발생되는 전기 제동력은 최소의 점착율을 갖는 제동력을 바탕으로 전기제동력을 계산한다.

이때 기대 점착계수는 8%로 한다.

$$Be = 234 \times 28.35 \times 0.08 \times 1000 = 18,720 \text{ Kgf}$$

차량의 제동은 우선 고속영역에서 65Km/h까지의 저속까지는 전기 제동력에 의해 감속을 수행하여 TC 차의 중량분에 따른 제동력은 M차의 회생제동력으로 보완하여 제동하며 이후 부터는 기계제동과 병용하여 차량의 제동을 수행한다.

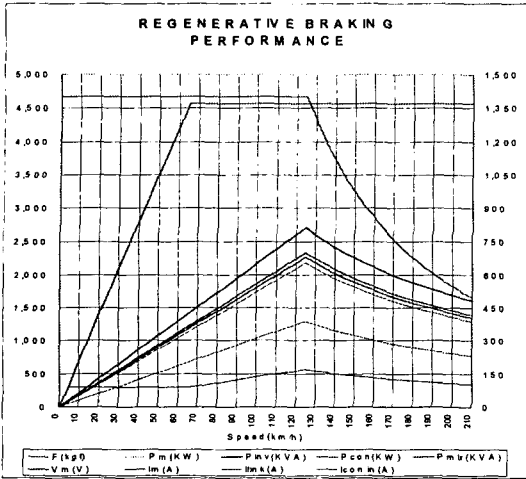


그림 3. TTX 차량 제동특성곡선

### 2.3 추진제어장치 사양(안)

견인제동력 특성곡선을 연구한다음 TTX 차량에 다음과 같은 추진장치사양을 선정하였다.

- (1) 방 식 : 전압형 단상 PWM 제어 CONVERTER  
전압형 3상 PWM 제어 VVVF  
INVERTER
- (2) 정 격 : 입력전압 : AC 840V x 2 x 2군  
(주변압기 2차 권선에서 공급)
- (3) 용량(컨버터): 제어용량 : 600Kw x 2  
입력전압 : AC 840V (단상)  
출력전압 : DC 1800V  
제어방식: PWM제어,역율제어, 비트  
레스 제어  
용량(인버터): 제어용량 : 650Kw x 2  
출력전압 : AC 0 ~ 1300V (단상)  
제어방식: Vector제어, SlipSide 제어
- (4) 장치구성 2 Converter, 1 Inverter, 4 Motor
- (5) 최대출력 1,520KVA 이상
- (6) 주전동기용 제어주파수 범위 0 ~ 200Hz
- (7) 사용소자 3300V - 1200A IGBT  
CONVERTER 1S - 2P - 4A - 2G (16EA)  
INVERTER 1S - 1P - 6A - 1G (6EA)
- (8) 제어전압 DC100V (70V~110V)
- (9) 중량 : 2.4 ton
- (10) 주요 기능
  - 옹하중제어, 공전활주재점착제어 및 Jerk 제어기능을 갖고 있다. 공전활주 재점착 제어는 벡터 제어에 의한 고속 응답성을 지닌다.
  - 고전압, 과전류 출력전류 불평형, 제어전압 저하등에 대한 보호기능을 갖도록 한다.
  - 회생제동 우선의 공기 BRAKE와 Blending 제어기능. 자기진단 기능은 있는 것으로 한다.

### 3. 결론 및 향후연구계획

전기철도차량 운행의 안정성뿐만 아니라 설계단계의 안정성을 확보하기 위해서는 차량의 핵심전장품인 전력변환장치인 추진시스템 설계기반기술의 확보가 그 무엇보다도 필요하다. 본연구에서 개발하고 있는 주변장치들은 IGBT를 사용하므로써 높은 스위칭 특성과 높은 신뢰성을 가지며, 또한 Snubber 및 Gate Power가 작게 되기 때문에 종래의 GTO를 이용한 주변장치에

비하여 약 1/2 이라는 대폭적인 소형·경량화 및 저소음화를 도모할 수 있다. 차량의 핵심기술인 추진제어장치를 설계하기 위해 차량에 필요한 모든 에너지를 산정하고 가장 적합한 추진시스템을 서래하여야 한다. 본 연구에서 개발하고 있는 TTX 차량용 추진시스템은 보다 안정된 시스템으로 설계하기위해 계속 연구하여야 한다.

### 참고문헌

- [1] S. Tamai et al., "3 Level GTO Converter-Inverter Pair System for Large Capacity Induction Motor Drive.", Proc. EPE, 1993, pp.45-50.
- [2] 추진제어장치 실용기술개발, 우진산전, 2003
- [3] Fang Zheng Peng, Jih-Sheng Lai, "Dynamic Performance and Control of a Static Var Generator Using Cascade Multilevel Inverters" IEEE 31st Annual Meeting pp.1009~1015, 1996.
- [4] 기존선 고속 톨딩 열차 차량 시스템 요구사항, 한국철도기술연구원, WBS No : 2100-D001 Rev.A