

# 전동차 추진제어장치 개발

## Development of EMU Traction Control System

이일호\*      이인석\*\*      정은성\*      한성수\*\*\*      배분호\*\*\*\*  
Lee, Il-Ho      Lee, In-Suck      Jung, Eun-Sung      Han, Sung-Su      Bae, Bon-Ho

### ABSTRACT

EMU Traction Control System has been largely relied on foreign technology until now. In this time, this system is developed by own local technology according to national technology development policy during 3 years. In this paper, the new developed Traction Control System of EMU and its testing results are introduced. The Traction Control System is consisted latest IGBT switching elements and its traction control algorithm is realized by the state-of-the-art technology, vector control. The system is fully tested in various conditions and the quality is well verified in those tests.

### 1. 서론

1978년 서울시 1호선 개통으로 시작된 대한민국의 지하철 역사는 이제 4개 도시, 12개 노선이 상업운전을 실시하고 있으며, 앞으로도 더욱 팽창할 전망이다. 이러한 양적인 팽창 뿐만 아니라 질적인 측면에서도 발전을 거듭하여, 전동차 추진장치 분야에서도 초창기의 저항제어(DC전동기)에서 출발하여 초퍼제어(DC전동기), GTO 인버터제어(AC전동기), 그리고 최근의 IGBT 인버터제어(AC전동기)로 그 기술이 빠르게 변화하고 있다. 이렇게 급변하는 전동차 제어기술을 확보하고 앞으로 더욱 증가할 국내외의 기술수요를 충족하기 위하여 산업자원부 산업기반기술개발의 일환으로 전동차추진장치 기술개발과제가 출발하였으며, 이제 3년의 연구기간을 완료하여 그 개발이 완료되었기에 다음과 같이 소개하고자 한다.

급변 개발 과제는 시스템 엔지니어링 기술개발(알루미늄자체개발 등), 전동차 추진장치 개발(IGBT VVVF INVERTER), 그리고 전인전동기 개발(Induction Motor)로 구성되어 있다. 이번 개발의 목표는 도시형 전동차의 전체 엔지니어링 기술 및 핵심 전장부품 기술을 완전히 국산화하는데 있다. 이 과제를 추진하기 위하여 4량(2M2T) 1편성의 알루미늄 차체를 제작하고, 여기에 자체 개발한 전동차 추진장치를 포함함 핵심 전장부품을 부착하여 그 성능을 시험하였다.

- 
- \* 한국철도차량(주) 중앙연구소 주임 연구원, 비회원
  - \*\* 한국철도차량(주) 중앙연구소 선임 연구원, 비회원
  - \*\*\* 한국철도차량(주) 중앙연구소 수석 연구원, 정회원
  - \*\*\*\* 서울대학교 전기공학부 박사과정, 비회원

## 2. 차량 시스템 구성

4량 1편성(2M2T)으로 구성된 시험차량은 각 M차에 차량추진장치 및 4개의 전동기가 부착되어 있다. Tc에는 TCMS, ACT/ATO장치, SIV 등의 장치들이 부착되어있다. 차량 시스템의 주요 사양은 표 1과 같다.

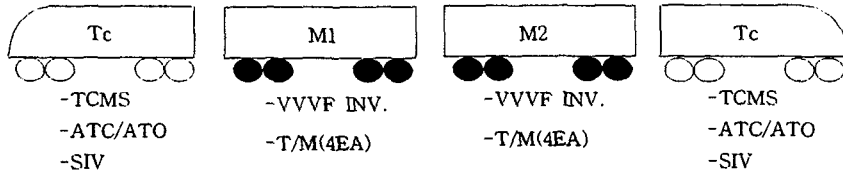


그림 1 차량시스템 구성도

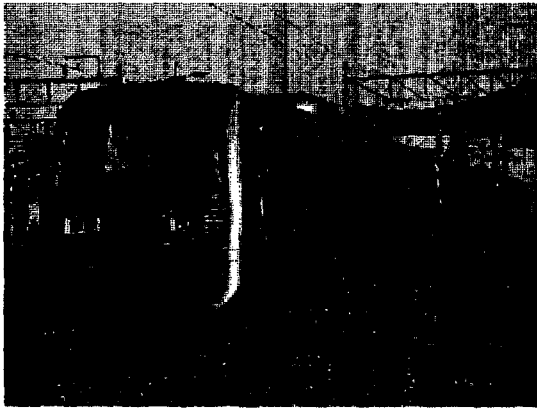


그림 2 개발 전동차

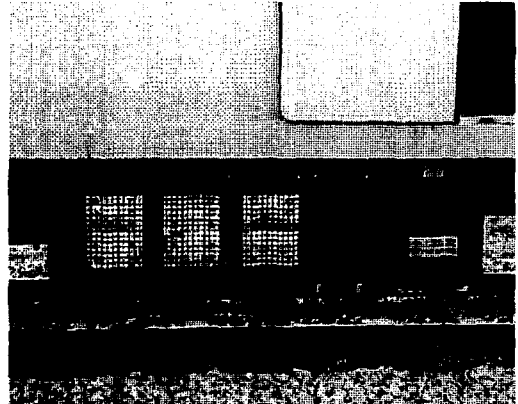


그림 3 전동차 추진장치

표 1. 차량시스템 주요사양

| 항 목   |                                           | 사 양                                                                                                                                              |                         |
|-------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| 차량    | 급전형식                                      | DC 1500V(1000V ~ 1800V)                                                                                                                          |                         |
|       | 편성                                        | 4량 1편성(2M2T), Tc - M1 - M2 - Tc                                                                                                                  |                         |
|       | 중량                                        | 공차중량                                                                                                                                             | Tc : 30ton<br>M : 34ton |
|       |                                           | 승객하중                                                                                                                                             | 20ton / Car             |
|       | 차륜경                                       | 820mm(성능기준) MAX : 860 mm<br>MIN : 780 mm                                                                                                         |                         |
|       | 기어비                                       | 7.07                                                                                                                                             |                         |
|       | 주요성능                                      | 최고속도 : 110km/h이상 (운행상 80km/h)<br>가속도 : 3km/h/s이상 (경지 → 35km/h)<br>감속도<br>상용시 : 3.5km/h 이상<br>비상시 : 4.5km/h 이상<br>저크한계 : 0.8m/sec <sup>3</sup> 이하 |                         |
| 추진장치  | 용량                                        | 연속 : 1100kVA ( 최대 : 1650kVA )                                                                                                                    |                         |
|       | 구성                                        | 1C4M(1S4P)                                                                                                                                       |                         |
|       | 주요소자                                      | 3300V/1200A IGBT                                                                                                                                 |                         |
|       | 냉각방식                                      | Heat Pipe 자연냉각방식                                                                                                                                 |                         |
|       | 크기(L×W×H) / 중량                            | 2200×1100×700 / 550kg                                                                                                                            |                         |
| 견인전동기 | 4극 유도전동기 ( 210kW(연속), 1100V, 136A, 75Hz ) |                                                                                                                                                  |                         |

### 3. 전동차 추진장치

#### 3.1 주회로 구성

전동차 추진장치의 주회로부는 옥상기기로 2조의 집전장치, 1조의 직류 피뢰기(Att), 그리고 주퓨즈(MF)로 구성되어 있고, 상하 기기로는 단순기함(LB Box), 인버터장치함(Inverter Box), 필터리액터(FL Box), 그리고 과전압 제어저항(Ovre Box)으로 구성되어 있다.

인버터 장치함의 주 전력소자는 3300V/1200A IGBT로 구성하여, 기존의 GTO시스템에 비해 부품수를 크게 줄이고, 구조를 단순화하여 중량 및 재료비를 낮추고 유지보수를 용이하게 하였다. 또, 주회로 소자의 생각에는 Heat Pipe방식의 자연냉각을 채용하였다. DC Link 캐패시터와 병렬로 연결된 과전압제어 저항과 제어장치를 가지고 있어서 가선 비수용 상황에서 공기 제동과 회생제동의 원활한 혼합제동이 가능하게 하였다.

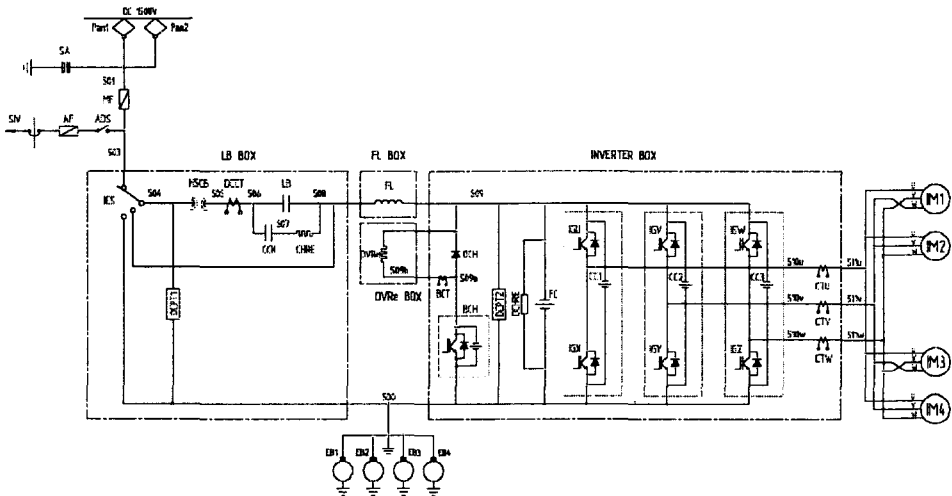


그림 4 추진장치 주전력 회로도

#### 3.2 제어기 구성

전동차 추진장치의 제어기는 기능별로 10장의 EURO Standard 6U 규격의 보드로 분류 구성하여 신뢰성을 높이고 유지보수가 용이하도록 하였다. 각 보드들은 VME 표준규격의 Back Plane으로 연결되어있어 기능확장이 용이하도록 설계되어 있다. 제어기의 주 연산장치는 32bit DSP를 채용하였고, Flex10K10등의 PLD를 적용하여 회로의 집적도를 높였다.

표 2. 추진장치 제어기 사양

| 항목     | 사양                         |
|--------|----------------------------|
| 주 연산장치 | TMS 320C31                 |
| 입출력장치  | 입력                         |
|        | 출력                         |
| 통신방식   | LON Work<br>RS 232, RS 422 |
| 온도사양   | -25℃ ~40℃                  |
| 제어전원   | DC 100V (70V ~110V)        |

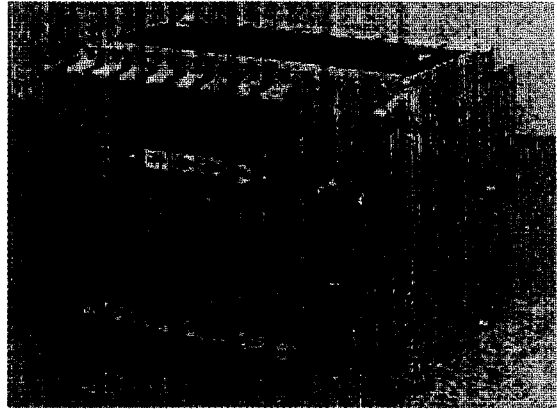


그림 5 추진장치 제어기

### 3.3 견인제어

견인제어의 기본 골격은 IGBT소자에 의한 빠른 스위칭 능력 최대한 활용하고 견인력 제어의 응답성을 높이기 위하여 벡터제어를 적용하였다. 철도차량의 특성상 고속에서는 인버터 출력전압이 제한을 받게 되므로 이러한 영역에서는 기존에 rms전류를 제어하는 방법에 비해, 추정된 자속을 바탕으로 슬립주파수를 이용하여 토오크분 전류( $I_{qse}$ )를 직접제어하는 형태의 스칼라 제어를 구현하여 제어에 응답성과 정확성을 확보하였으며, 벡터제어와 스칼라제어의 변환이 용이하도록 하였다.

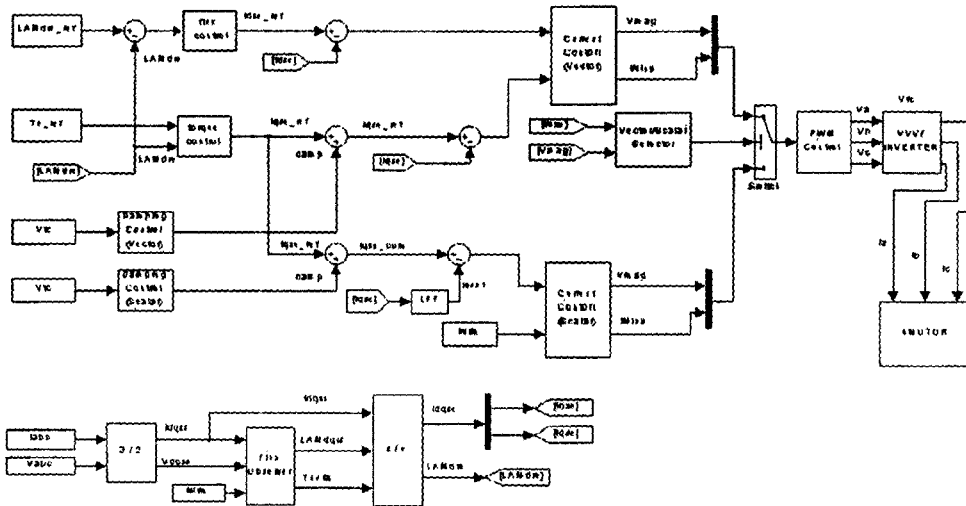


그림 6 견인제어 블록다이어그램

벡터제어의 핵심이 되는 회전자 자속각을 추정하는 알고리즘은 저속에서는 전류모델이, 고속에서는 전압모델이 우세한 모델을 적용하여 직접벡터제어를 주로 사용하였다. 그리고 재기동 상황에서는 간접 벡터제어로 flux buildup하는 알고리즘을 적용하였다. 또한, 벡터제어시 큰 영향을 미치는 전동기 상수들의 변화를 보정하는 알고리즘을 적용하여 다양한 환경에서 제어의 신뢰성을 높였다. 토오크의 제어 응답성이 빠른 벡터제어의 적용으로 차량의 저크 제어, 슬립/슬라이드 제어, DC Link단의 댐핑제어 성능이 기존의 스칼라 제어에 비해 우수하게 구현 되었다.

### 3.4 PWM 제어

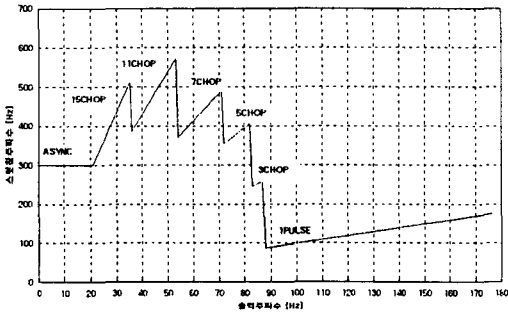


그림 7 모드변환이 있는 동기 PWM

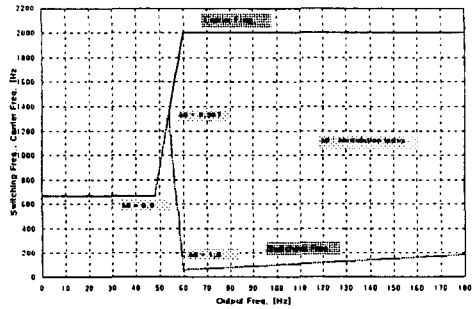


그림 8 모드변환이 없는 비동기 PWM

기존의 GTO소자를 사용하는 경우, 스위칭 주파수가 수백Hz 정도로 제한받게 되고, 스위칭 손실도 IGBT소자에 비해 크므로 그림 7과 같이 모드변환을 감는 동기 PWM방식을 사용하였다. 그러나, 이번 개발에서는 원활한 벡터제어와 동기모드변환에 따르는 모드변환 스위칭 소음을 제거하기 위하여 전구간 비동기 PWM방식을 채택하였다. 비동기 PWM을 적용하기 위해서는 비동기 PWM에 의한 전류 고조파 성분을 억제하기 위하여 주파수 변조율( $m_f$ )이 최소 15이상이 확보되어야 하는데, 본 개발과제에서는 이 기준을 지키면서 스위칭에 의한 발열을 고려하여 그림 8과 같이 저주파에서는 일정한 스위칭 주파수를 유지하면서, 고주파에서 스위칭 주파수를 같이 증가시키는 방법을 취하였다. 이 때 PWM 방식은 공간벡터변조방법으로 하였다.

### 4. 시험결과

전동차 추진장치는 개발단계부터 단품시험, 관성부하장치를 이용한 조합시험, 차량 구내 시운전, 본선 시운전(상주공장) 및 6호선 본선 시운전(그림 9, 그림 10)의 다양한 시험절차를 거쳤다.

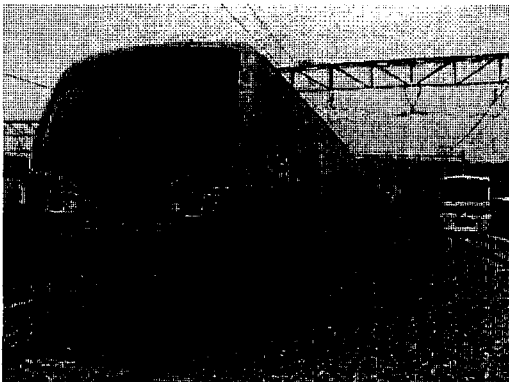


그림 9 본선 시운전(6호선 신내기지)

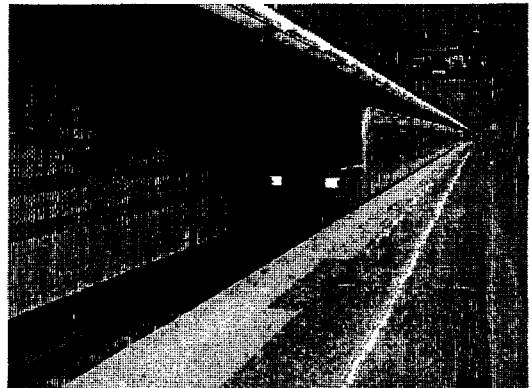


그림 10 본선 시운전(6호선 봉화산역)

단품 단계에서는 진동시험, 저온/고온시험, Noise인가시험 등의 단품의 신뢰성 시험과 조합시험설비에 연결하여 기본적인 제어성능, 소음시험 및 가선급변, 정전 등의 급격한 외란에 대한 신뢰성 시험들을 통과하였다. 또, 이번 개발단계에서 동시에 제작된 시제차에 탑재하여 역행/제동시험, 최고속도 시험, 슬립/슬라이드 시험, 저크측정, 유도장애 시험 등 현차기준의 시험을 실시하였다. 이번 시험을 통하여 총 10,000km 이상의 주행을 무사고로 완수하여 그 신뢰성을 확보하였고, 제품 시험 기간이 4계절을 두루 걸쳐면서 다양한 기온환경에서의 성능이 입증되었다.

본 논문에서는 대표적인 몇 가지 시험에 대한 결과를 다음과 같이 소개한다.

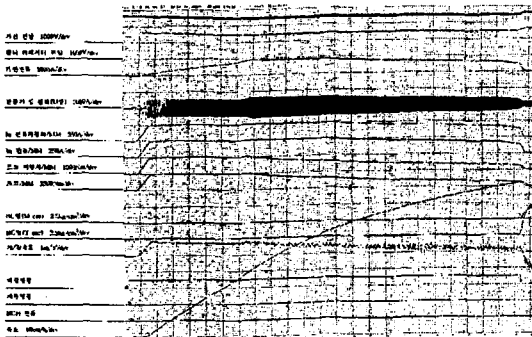


그림 11 최고속도 시험파형

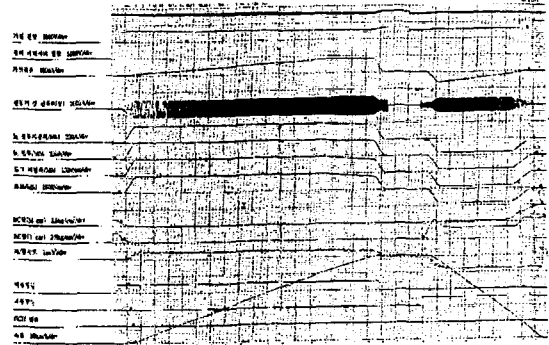


그림 12 개방운전 시험파형

- 최고속도 시험

최고속도 시험은 상주공장의 1.5km구간의 시험선로에서 행해졌다. 선로길이의 제약으로 97km/h의 속도까지 시험되었으며, 전 속도영역에서 양호한 승차감을 확인하였다. 또, 기구적인 측면에서도 우수함을 확인하였다. 시험결과는 그림 11과 같다.

- 개방운전 시험

개방운전의 시험파형은 그림 12와 같다. 개방운전시험은 2M2T의 편성에서 1개의 인버터를 cut한 상태(1M3T)에서 나머지 1개의 인버터 만으로 원활하게 구동되는지 여부와, 가속시간이 길어지는 상황에서 열적인 문제가 발생하지 않는가를 확인하였다.

- 저크측정

저크는 가속도의 미분으로 정의되며 승객이 느끼는 승차감을 가늠하는 요소이다. 저크측정은 역행 및 제동조건에서 모두 측정하였다. 시험결과는 모두 기준치 0.8m/sec<sup>3</sup> 이하를 만족하였으며, 그림 13의 시험결과는 역행조건에서 노치를 4N→off→4N를 반복하였을 때의 파형이다.

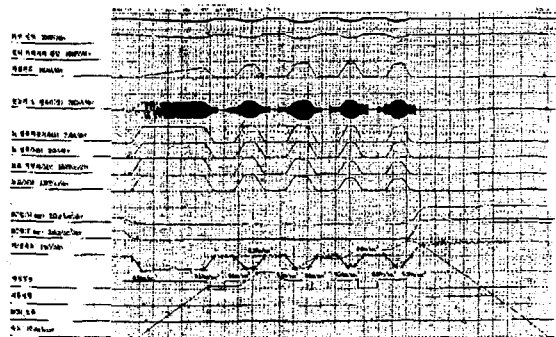


그림 13 저크측정 시험파형

- 슬립/슬라이드 제어 시험

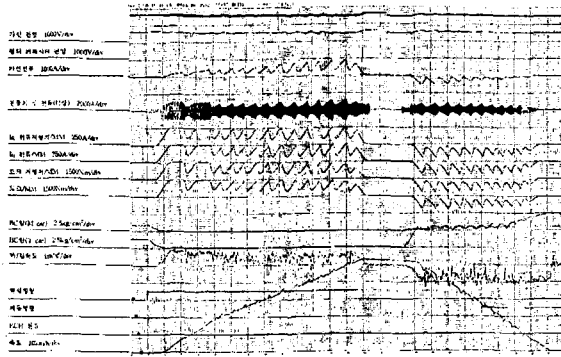


그림 14 슬립/슬라이드 시험파형

슬립/슬라이드 제어는 슬립 및 슬라이드 상황의 감지 및 견인력 및 제동력의 적절한 제어가 중요하다. 슬립/슬라이드 제어가 실패할 경우 전동차 바퀴가 손상되므로 속응성 있는 제어가 필요하다. 본 개발과제에서는 다양한 악조건(폭우, 비눗물 살포 등) 상황에서 시험을 실시하여 양호한 시험 결과를 확인하였으며, 그 시험파형의 일부를 그림 14에 표시하였다.

- 유도장애 시험

유도장애시험은 전도성 간섭시험, 유도성 간섭시험, 그리고 복사성 간섭시험 등이 있다. 각 시험은 다양한 주파수 대역에서의 시험기준이 있으며, 이번 시험에서 모두 양호한 결과를 얻었다. 그림 15은 복사성 간섭시험중 55MHz 대역의 시험결과이다.

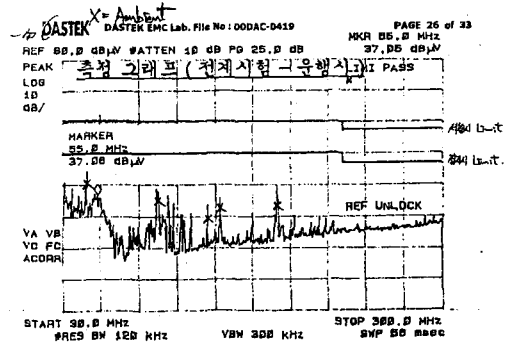


그림 15 복사성 간섭시험 결과(55MHz)

5. 결론

이번에 개발된 전동차 추진장치는 인버터 주회로, 제어기 하드웨어는 물론, 외국업체에서 기술이전을 기피하는 소프트웨어까지 완전히 국산화했다는 데 의미가 있다. 특히, 이번에 그 우수성 및 신뢰성이 확보된 전동차 추진제어 알고리즘은 전기기관차, 경전철, 고속전철 등 다양한 형태의 전기철도에 적용이 가능하여 향후 큰 수요증가가 예상되는 전기철도차량의 국산화에 기여하리라 생각된다. 또한, 이번 개발과제는 차량의 단품뿐만 아니라 차량전체의 시스템 엔지니어링 기술을 함께 확보하여 국내·외의 차량수요에 순수 국내기술로 대응할 수 있는 계기가 된 것에 큰 의미가 있다고 하겠다.