

# 추진제어장치 특성 연구

## The study of propulsion control system

권일동\*      김동명\*\*      정은성\*\*\*      이상준\*\*\*\*      최종묵\*\*\*\*\*  
Kwon, Il-Dong\*   Kim, Dong-Myung\*\*   Chung, Eun-Sung\*\*\*  
Lee, Sang-Jun\*\*\*\*   Choi, Jong-Muk\*\*\*\*\*

### ABSTRACT

This paper describes the characteristic feather of propulsion system adopting mass production. The train formation is composed of 4 cars by 2 Motor cars and 2 Train cars. Acceleration rate must be 3.0 km/h/s or more when the car starts up to 35km/h by 16ton of passenger load. The system information supervision is easy because the system is controlled to perfect digital circuits, all information of an action is stored in a memory and is managed. The control system is composed of a fully digital circuit and a high level software such as C language. The DSP TMS320C31 is used for main processor and has the capability of 50MHz, 32bit floating point operation and has a C compiler. Therefore, the implementation of control algorithm and the change of function are easy. VVVF inverter using IGBT conducted variable combined test, environment test using chamber, interface test and field test etc.

### 1. 서론

2000년대 국내에는 인버터 개발 과제 수행 및 양산 수행으로 인해 전동차 추진제어장치도 점차 국산화 / 특성화 되어 가고 있다. IGBT VVVF 추진제어장치의 경우 국내에서 활발한 연구활동으로 인해 관련 핵심기술개발이 완료 되었다. 이에 본 연구에서는 기 개발 과제를 실용화 하고 수정 / 보완하여 국내 차량에 추진제어장치가 가지는 특성에 관해 연구하였다. 아울러 국내차량에 적용될 System을 초기 단품시험에서부터 본선시운전등을 실시하여 추진제어장치의 성능을 시험하였다.

- 
- \* (주)로템 기술연구소 연구원
  - \*\* (주)로템 기술연구소 주임연구원
  - \*\*\* (주)로템 기술연구소 선임연구원
  - \*\*\*\* (주)로템 기술연구소 책임연구원
  - \*\*\*\*\* (주)로템 기술연구소 수석연구원

## 2. 시스템 구성

표1. 차량시스템 주요사항

전기적 사양	출력 용량		연속 1,100kVA(최대 1,650 kVA)
	입력전압	정격 전압	DC 1,500V
		동작 허용 범위	DC1,000V ~ DC 1,800V
	출력전압	최대 전압	AC 1100V (DC 1500V)
최대 주파수		180 Hz	
시스템 사양	제 동		전기적 회생 제동과 공기 제동의 혼합 제어 방식
	견인전동기	구 성	1C4M 방식 ( 4대 병렬 운전)
		사 양	4극, 동형유도전동기, 210kW
	가감속특성	용 량	8mH, 6000 $\mu$ F
가속 특성		3.0 km/h/s	
구성 사양	반도체소자	스위칭소자	IGBT (3300V, 1200A) (1S 1P/Arm)
		냉각장치	주행풍을 고려한 Heat-Pipe 및 냉각팬을 이용한 자연 냉각 방식
	PWM방식	방 식	상별구성
		구 현	비동기(공간벡터방식)-과변조1-과변조2-1펄스 Full Digital 방식 (Software로 구성)
시스템 사양	견인력 제어	방 식	가변 전압 가변 주파수
		방 법	벡터 제어
	점착력 제어		점착력 추정에 의한 순시 제어
	제어기 구성		32bit Digital Signal Processor 사용
JERK 방지 제어		Soft Start / Stop 기능	
기	Monitoring 기능	방 법	Mon board PC (RS232)
		내 용	동작 상태, 고장 내용 (On/Off Line)
타	보호 동작	전류 항목	입력 과전류, 출력 과전류, 상불평형 등
		기 타	입력 과전압, FC 충전 실패, 제어 저전원, 주회로 접지고장, 입력 저전압, 속도이상 검지등

### 3. 전동차 추진제어장치

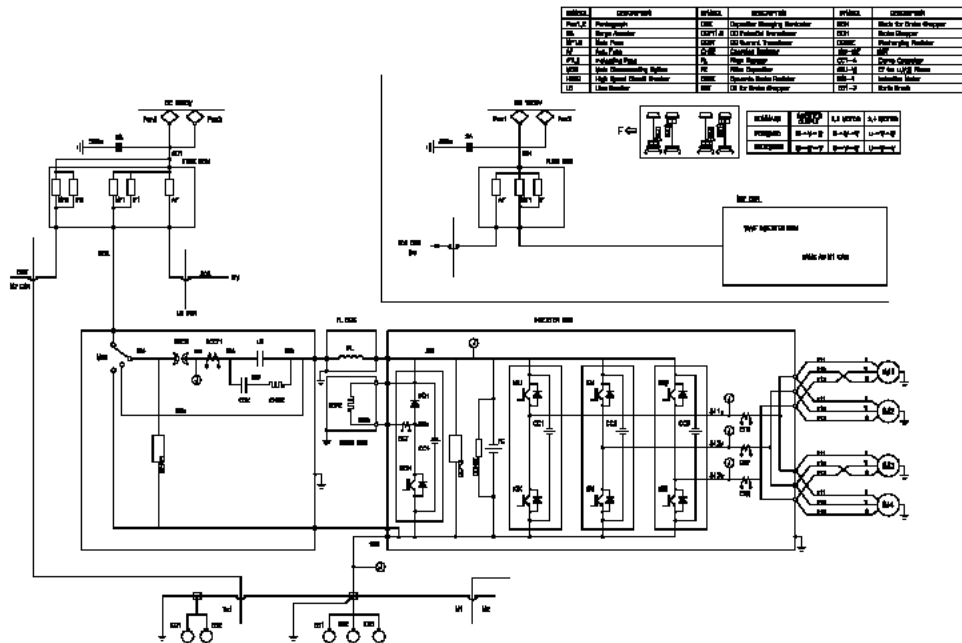


그림 1. 추진제어장치 주회로도

(1) 목적

인버터제어는 필요한 토크를 얻기 위하여 인버터에 의해 발생된 출력전압으로 전동기 전류를 제어하고, 스위치 주파수의 활용을 최대화하여 전동기전류의 고조파성분을 최소화하고, 이상적인 인버터 제어를 하는데 목적이 있다.

(2) 기능

1) 벡터 제어와 스칼라 제어의 병용

벡터 제어는 순시 토크 제어가 가능하기 때문에 슬립주파수 제어보다 토크 제어 성능이 우수하다. 슬립주파수 제어는 구배에서의 기동 시에나 저속 운전 영역에서 구동 특성이 나쁘다. 일반적으로 과변조 영역 운전이나 1펄스 모드 운전의 경우에는 벡터 제어를 사용할수 없고 슬립주파수 제어만이 가능하다. 따라서 저속의 선형 제어 영역에서는 벡터 제어를 사용하여 정밀한 순시 토크 제어가 가능하도록 하여 우수한 기동 특성과 저속 운전 특성을 갖도록 하며, 고속의 1펄스 모드 영역에서는 슬립주파수 제어를 적용하여 평균적인 전류 및 토크 제어가 가능하도록 하였다.

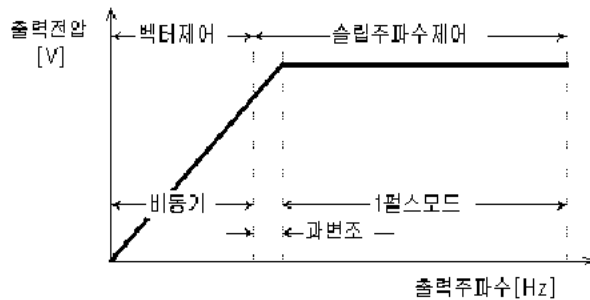


그림 2 벡터 제어와 스칼라 제어 병용

## 2) 벡터 제어

전동기의 순시 토크는 전류와 이에 직각으로 쇄교하는 자속에 의해 결정되므로 순시 토크를 제어하기 위해서는 전류와 자속을 공간적으로 크기와 방향을 동시에 제어할 수 있는 순시 전압  $v_{qs}^*, v_{ds}^*$  를 발생시킨다. 아래의 벡터 제어 블록도에서, 추정 자속과 토크 기준치를 이용하여 각각 자속분 전류와 토크분 전류를 계산하고 PI 제어기를 통해 순시 전압을 발생시키고, 추정된 회전자 자속각( $e$ )과 샘플링 위상( $\alpha$ )을 이용하여 주파수를 계산한다. 이와 같이 계산된 순시 전압, 전압의 위상 및 주파수는 PWM 블록에서 최종 가공되어 게이팅 온-오프 시점이 출력된다.

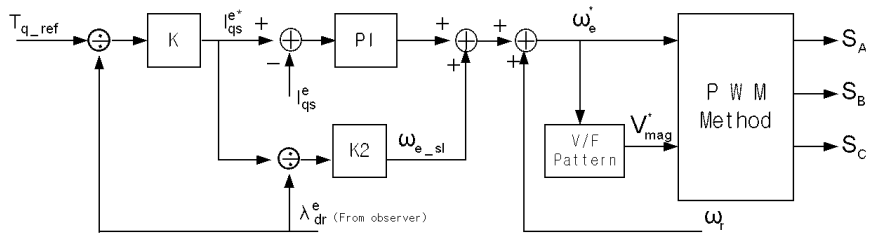


그림 3. 스칼라 제어 다이어그램

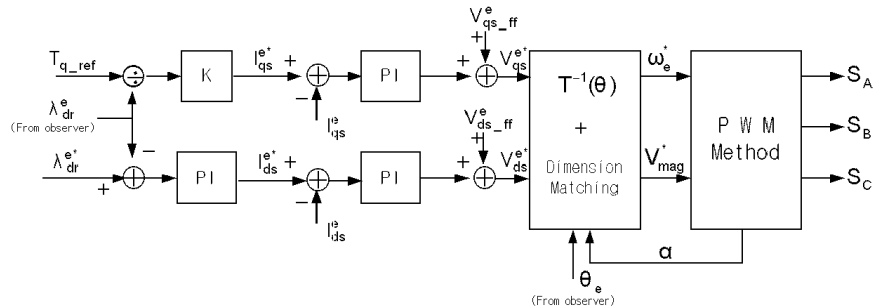


그림 4. 벡터 제어 다이어그램

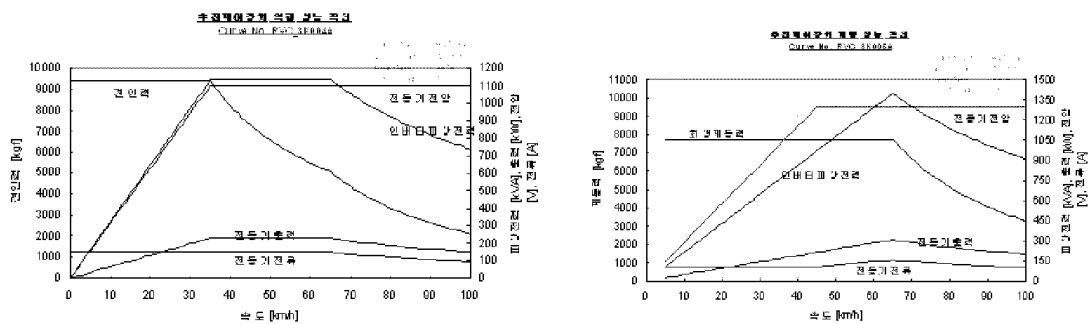


그림 5. 견인력 / 제동력 패턴

## 3) FC 전압 안정화

주회로의 L, C 사이에서 형성되는 공진주파수 대역을 확인하여 대역의 필터링을 위해서 나온 결과값( $f_{vc}$ )을 토크전류 기준값에 보상을 통해 공진현상을 막을 수 있다. 물론 실제 전류제어기에서 제어 지연이 있기 때문에 특성의 저하가 발생할 수 있는데 이를 보상하기 위해 Compensator가 필요하다.

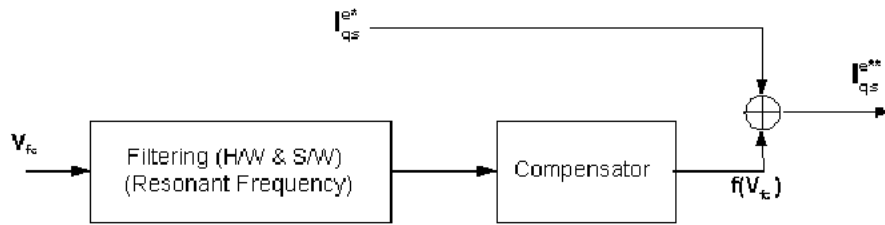


그림 6. FC 전압 안정화 제어 블럭도

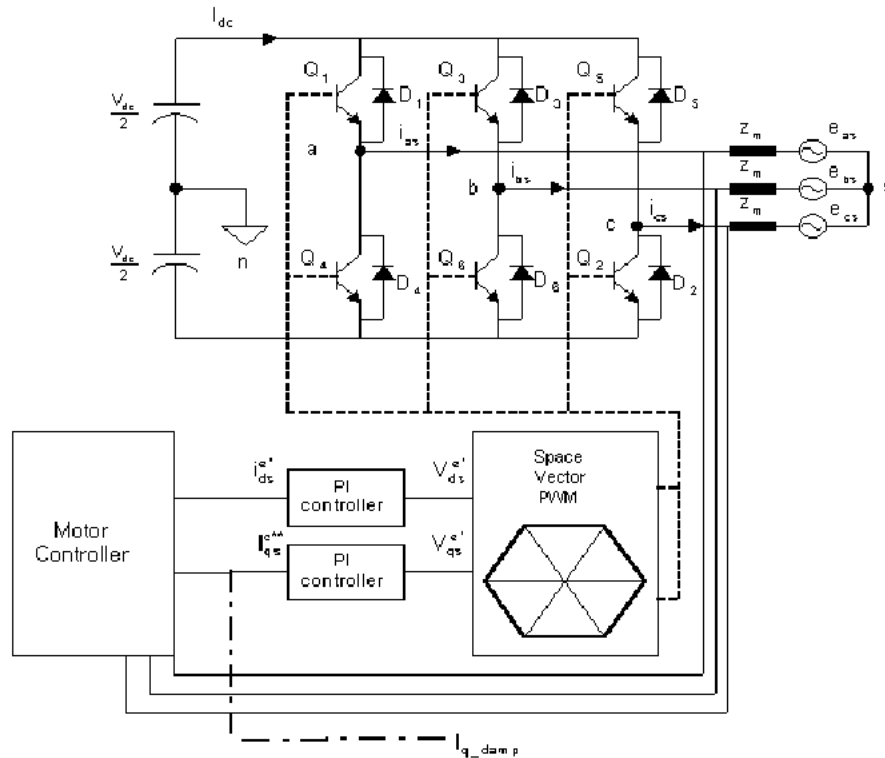


그림 7. FC 전압 안정화 개략도

#### 4. 시험 결과

전동차 추진제어장치는 제작단계에서부터 단품시험, 관성부하장치를 이용한 조합시험, 차량 구내 시운전, 본선 시운전등의 다양한 시험 절차를 거쳤다. 단품단계에서는 진동시험, 저온/고온시험, Noise 인가시험 등의 단품의 신뢰성 시험과 조합시험설비에 연결하여 기본적인 제어성능, 소음시험 및 가선급변, 정전등의 급격한 외란에 대한 신뢰성 시험들을 통과하였다. 본선시운전에서는 역행 / 제동시험, 감가속도 시험, 슬립 / 슬라이드 시험, 저크 측정, 유도장애 시험등 현차기준의 시험을 실시하였다. 본 논문에서는 대표적인 몇가지 시험에 대한 결과를 다음과 같이 소개한다.

##### (1) 조합 시험

인버터를 실제 가선 상태의 본선 주행 상태의 관성부하 조건하에서 각종 인버터에 특성을 확인 해 보는 시험이다. 여기서는 대표적으로 제어전원 차단시험, 전압 급변 시험, 가선 정전시험등을 소개 하였다.



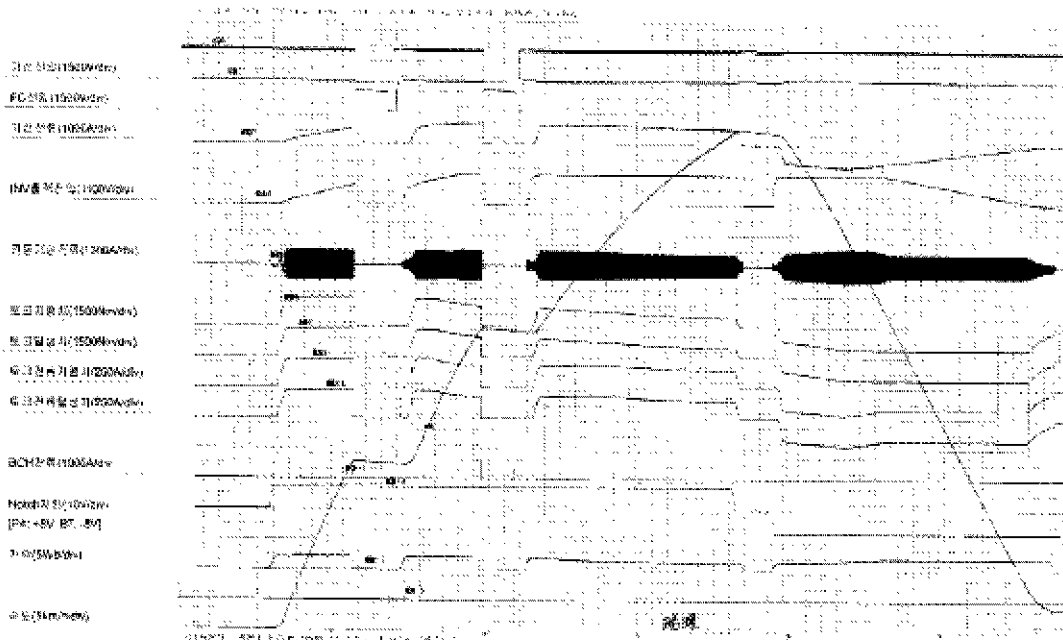


그림 10. [조합시험] 가선 정전 시험 파형

(2) 본선 시운전

- 1) 실제 부산 전동차 영업 운행 구간 중 하나인 부산 3호선 1단계 본선구간 (강서구청~체육공원)을 이용하여 본선 시운전을 실시하였다.

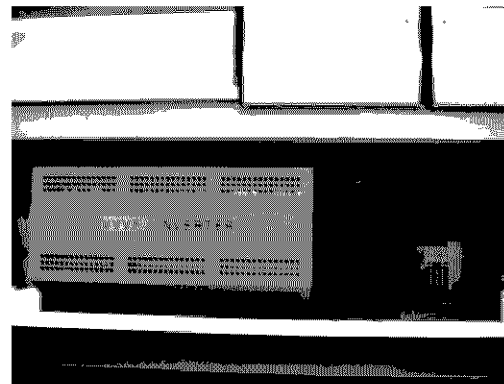


그림 11. 본선 시운전 시험

실제 본선 시운전선(부산 전동차 3호선 본선 강서구청 ~ 체육공원)에서의 주행시 출력 파형을 나타낸다. 실제 파형 구현이 조합시험에서 구현된 것과 크게 다르지 않는 파형을 얻을 수 있었다.

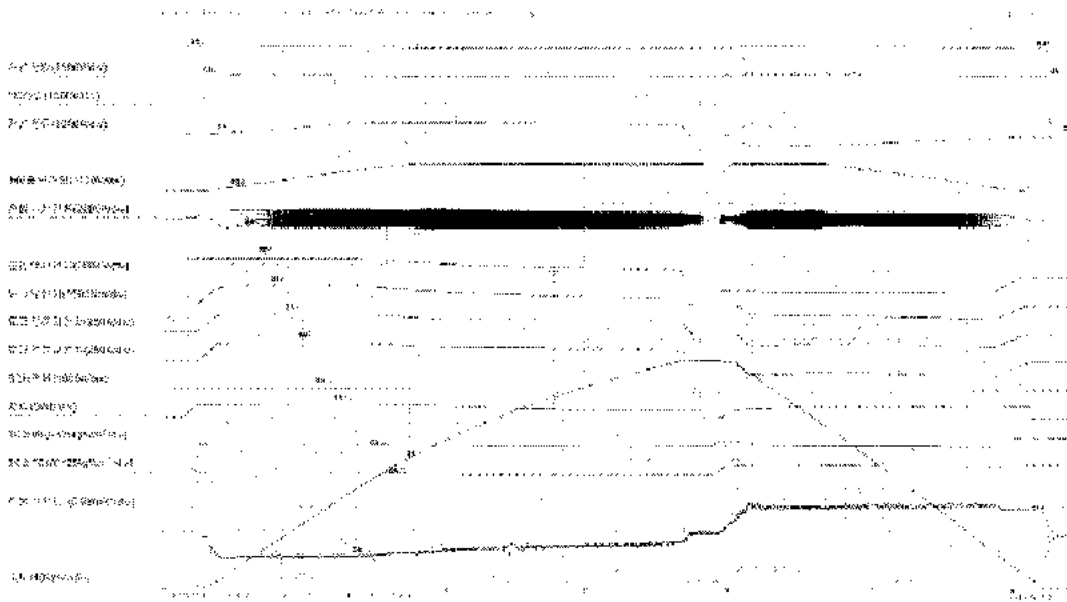


그림 12. [본선시운전] 토크 특성 파형

가속도의 기울기(jerk)도 기준치 대비하여  $0.8 \text{ m/s}^2$  이하의 레벨로 구동하는 것을 볼 수 있다. TCMS (Train Control Monitoring System) 도 제동력의 지령치가 실제 회생력과 공기제동력(BC압-M car, BC압-Tc car)으로 원활하게 분배되는 것을 확인 할 수 있다. 토크의 패턴 변화도 각 주파수 별로 변화하는 것을 확인 할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 실제 양산 전동차에 IGBT VVVF 인버터 추진제어장치를 탑재 하여 차량의 주행 상태를 확인 할 수 있었다. 그리고 주행에 필요한 각종제어(토크제어, PWM 제어, Vector/Scalar 제어)등을 고성능 마이크로 프로세서 (TMS 320C31) 로 구현하고 상태를 확인 할 수 있었다. 또한 각종 조합시험과 환경시험등 단품 시험과 공장내 주행 시험, 차량 인터페이스 시험 및 역행 / 제동, 감가속도, 가선전압 변동, 구배 시험, 회생 제동 시험등의 본선시운전 시험과 같은 수많은 시험을 거쳐서 인버터 성능을 확인할 수 있었다. 이는 전동차 추진제어장치 제작에 독자적 기술을 확보하게 되었으며 이후 추가로 건설되는 국내 전동차 추진제어장치의 경쟁력 확보에 이바지 하는 결과를 가져오게 되었다.

## 참고문헌

1. J.Holtz, "PWM-A Survey", Conf. Record of IEEE PESC'92, pp11-18, 1992
2. 김준석, 설승기, "공간전압벡터 PWM의 새로운 기법", 전기학회 논문지 44권 7호 pp,865~874
3. 정은성, 박윤환, 장경현, 김진선, 한성수, "철도 차량용 IGBT 추진제어장치", 한국 철도 학회.
4. 이일호, 이인석, 정은성, 한성수, 배본호, "전동차 추진제어장치 개발", 한국철도학회.