

## 도시철도차량용 IGBT 인버터 관성부하시험

김길동·한영재·변윤섭·박현준·이우동  
한국철도기술연구원

## A Inertia Load Test of IGBT Inverter for Urban Rail Traction

Gil-Dong Kim · Hyun-June Park · Young-Jae Han · Woo-Dong Lee · Yeun-Sup Byun  
Korea Railroad Research Institute, KRRI

### Abstract

In this paper, we studied IGBT VVVF inverter for 1C4M propulsion system of railway traction. This inverter is consisted in inverter stack, DB unit, and control unit. To prove performance of inverter carry out combine test. This test verifies that performance of inverter is excellent.

### 1. 서론

최근들어 산업발달과 생활범위의 확대로 운송시스템에 대한 수요가 급격히 증대되고 있다. 그러나 물류 이동에 필요한 여러 가지 제반시설은 이를 충족시키지 못하고 있으며, 이로 인하여 현재 국내의 물류수송효율은 최악의 상황에 직면해 있다. 이로써 대용량의 수송능력을 담당하는 철도차량 운송시스템에 대한 수요가 더욱 급증하게 되었다.

따라서 이에 대비하고자 많은 신규노선을 계획하고, 이와 함께 신설되는 노선에 대해서는 시스템 운영 효율의 극대화를 위해 노선별로 고속전철과 지하철, 경전철, 그리고 자기부상열차 시스템 등 여러 가지 방식을 검토 중에 있다.

최근 철도차량 구동용인버터는 고내압, 대용량 IGBT의 실용화로부터 고성능화, 장치 소형화, 경량화가 진행되고 있다. 이번 도시철도 표준화사업을 통하여 도시철도차량 추진제어장치인 IGBT인버터(3.3kV, 1200A)를 개발하였다.

2레벨에 의한 구조적 소형, 경량화를 추구하고 회생효율 등 점착성능향상의 한층 높은 알고리즘을 적용하고, 모터제어의 정밀도 향상, 고속도오크 제어가 가능한 벡터제어를 채용하여 IGBT의 특징을 살리는 고성능제어를 실현하였다.[1][2][3]

본 논문에서는 표준화사업의 일환으로 우진산전과 함께 개발한 도시철도차량용 VVVF IGBT인버터 관성부하시험결과에 대하여 언급하고 있다.[4][5]

### 2. 주회로 시스템

주회로 시스템의 구성을 그림 1에 표시하였다. 또한 도시철도차량 추진용 인버터 주회로 방식에서 1상당 1100kVA이상의 출력을 확보하고 200kW유도전동기 4대를 병렬운전하였다.

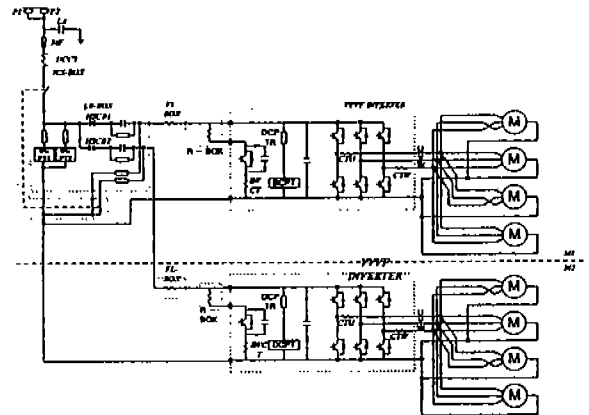


그림 1. 주회로도

인버터 주요제원은 다음과 같다.

- 1) 주회로방식 : 1C4M
- 2) 방식 : PWM 변조방식 전압형 VVVF 인버터
- 3) 정격
  - 입력력 : DC 1500V(1000~1800V)
  - 최고속도 : 100km/h
  - 운행최고속도 : 80km/h
  - 가속도 : 3.0km/h/s

- 감 속 도 : 3.5km/h/s(상용최대),  
4.45km/h/s(비상)
- 표정속도 : 35km/h
- 4) 냉각방식 : Heat Pipe 자연냉각방식
- 5) 제어전원 : DC 100V(70~110V)

가. 인버터 Box구성

인버터 Box의 내부구성은 인버터 Stack(U상, V상, W상), DB unit, 제어장치, 인터페이스 장치로 구성된다. SS41계의 일반 강철로 외함을 구성하고 있으며 유지보수의 편리성을 고려하여 유니트별로 별도의 분리벽을 설치하였다.

또한 Press pack IGBT소자를 사용하여 Thermal cycle Tolerance를 높여 신뢰성을 확보하였다.



그림 2. 인버터의 외형도

가. 인버터 Stack

인버터 stack의 중요 포인트는 소자방열과 취부 size를 효율적으로 처리하고 유지보수를 고려하여 설계하여야 한다. 멀티레이어를 갖는 busbar를 설계하는 방식도 있지만 고장시 쉽게 발견할 수 없기 때문에 PPI소자를 사용하여 분산방식 구조로 3개 stack을 구성하고 구성품 중 캐패시터의 위치가 IGBT단자에 최단거리로 취부되어 전압변동에 안정적일 수 있도록 stack를 설계하여 유지보수를 고려하였다. 또한 IGBT소자의 스너버 대응으로 상캐패시터를 사용하여 IGBT소자의 성능을 최대한 유지하도록 온도특성이 강한 오일캐패시터를 사용하였다.

Press pack IGBT소자는 냉각특성이 뛰어난 압접형소자를 사용하였으며, 소자의 특성상 양면냉각이 가능하여 소자양면에 Heat pipe를 사용하는 자연냉각방식을 이용하였다. IGBT소자는 인버터가 1kHz로 스위칭할 경우 1pulse mode에서 비동기로 변환시 발열량은 IGBT손실 917W, Diode손실 238W로 하여 설계시 고려하였다.

나. DB 유니트

전동차 감속시 회생제동과 관련하여 인버터의 회

생에너지를 가선으로 보낼 수 없는 경부하조건에 대해 가선전압의 회생제동을 변경시켜서 회생실패를 최소화하였다. 에너지 효율측면에서 최대 전기에너지를 이용하는 방법으로 DB 유니트를 이용하여 5초간 발전제동을 담당할 수 있도록 소자의 용량을 설계하였고, 3초간은 회생 에너지를 담당하고 2초간 전기제동과 공기제동이 블렌딩할 수 있도록 설계하여 장치의 효율적인 구성이 이루어질 수 있도록 설계하였다. 그림 3은 DB유니트의 외형을 보여준다.

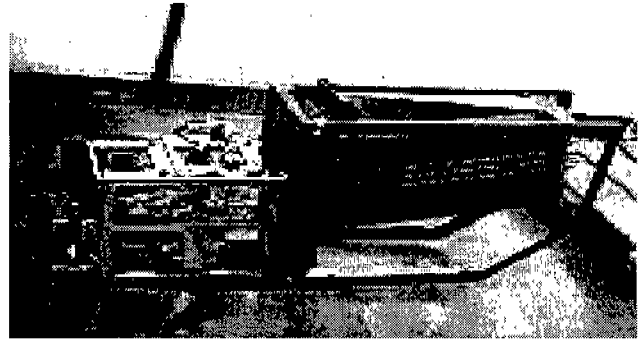


그림 3. DB(Dynamic Brake) 유니트

다. 제어 유니트

인버터 제어방식은 간접벡터방식을 사용하였고 전류검출용센서를 설치하여 각 상의 전류를 검출하였다. 이 전류를 자속분전류와 토크분 전류로 분리하여 토크제어를 수행하는 벡터제어방식을 적용하였다. 제어장치의 구성은 PWM제어보드와 외부의 7세그먼트를 탑재하고 고장기록을 수행하는 IND16, 외부장치와의 인터페이스를 담당하는 INF보드와 전원전압의 안정화를 위한 2차 필터부로 설계되었으며, 후면부에는 제어전원부를 탑재하여 간략화한 구조로 처리하였다. 그림 4와 5는 각각 제어장치의 외형과 구성도를 보여준다.

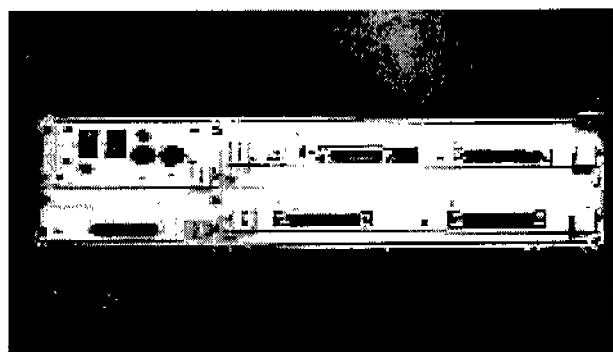


그림 4. 제어 유니트

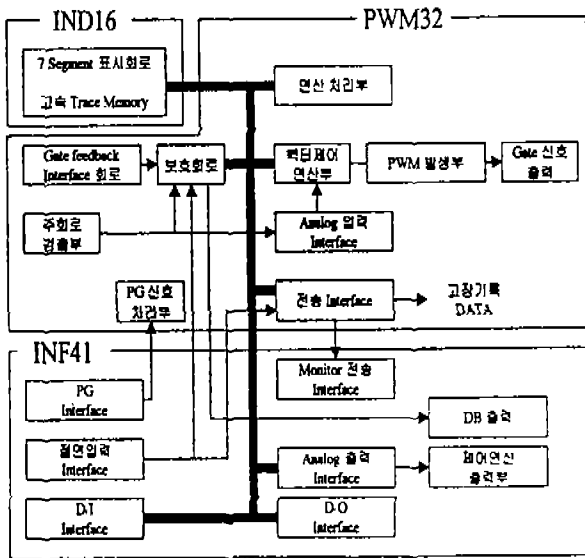
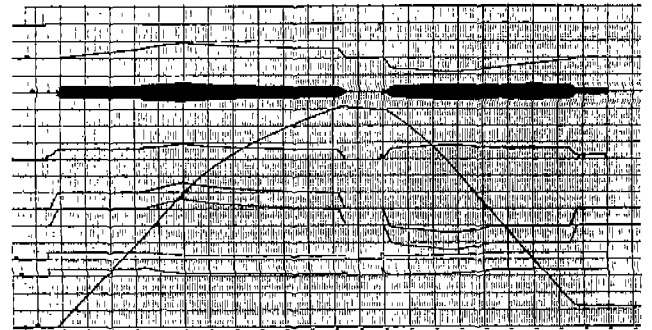


그림 5. 제어장치의 구성

### 3. 시험결과

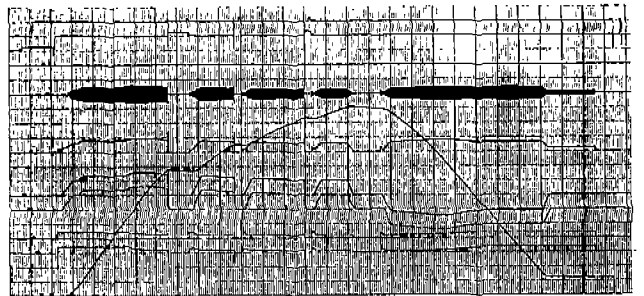
도시철도차량용 추진제어 인버터에 벡터제어를 적용하여 시험하였다. 사용된 시험장치는 최대 1600kVA급의 IGBT형 VVVF인버터와 200kW급 견인전동기 4대가 병렬로 구성되었고, 부하로는 전동차 2대분에 해당하는 관성을 등가모델링한 등가관성체 (11.1ton×2대)를 사용하였고, 기어비 3.764, Fly-wheel반경 0.76m를 사용하였다.

그림 6은 인버터로 4대의 견인전동기를 제어하면서 얻은 견인 및 회생특성시험에 관한 결과로, 기동시 속도지령치에 대한  $I_q^*$ 전류,  $I_q$ 전류,  $I_d^*$ 전류,  $I_d$ 전류가 순시적으로 제어되고 있음을 알 수 있다. 그림 7과 8은 순시정전시험과 부하변동시험을 실시한 결과를 나타낸다. 순시정전시험이나 부하변동시험의 경우에도 인버터가 정상적으로 동작함을 알 수 있다. 제작된 인버터의 제어 성능이 양호함을 조합시험을 통해 확인할 수 있다.



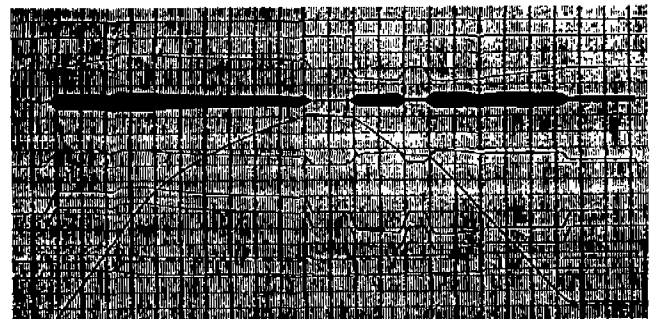
- ① 가선전압[1500V/div]      ② FC전압[1500V/div]
- ③ 입력전류[1000A/div]    ④ TM전류 V상[1000A/div]
- ⑤ TM전류 실효치[800A/div] ⑥  $I_q^*$ 전류[800A/div]
- ⑦  $I_q$ 전류[800A/div]      ⑧  $I_d^*$ 전류[800A/div]
- ⑨  $I_d$ 전류[800A/div]      ⑩ 출력주파수[10Hz/div]

그림 6. 견인 및 회생특성시험



- ① 가선전압[1500V/div]      ② FC전압[1500V/div]
- ③ 입력전류[1000A/div]    ④ TM전류 V상[1000A/div]
- ⑤ TM전류 실효치[800A/div] ⑥  $I_q^*$ 전류[800A/div]
- ⑦  $I_q$ 전류[800A/div]      ⑧  $I_d^*$ 전류[800A/div]
- ⑨  $I_d$ 전류[800A/div]      ⑩ 출력주파수[10Hz/div]

그림 7. 순시정전시험



- ① 가선전압[1500V/div]      ② FC전압[1500V/div]
- ③ 입력전류[1000A/div]    ④ TM전류 V상[1000A/div]
- ⑤ TM전류 실효치[800A/div] ⑥  $I_q^*$ 전류[800A/div]
- ⑦  $I_q$ 전류[800A/div]      ⑧  $I_d^*$ 전류[800A/div]
- ⑨  $I_d$ 전류[800A/div]      ⑩ 출력주파수[10Hz/div]

그림 8. 부하변동시험

## 4. 결 론

본 연구를 통해 개발한 IGBT인버터에 관한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 인버터 구동은 일괄제어방식을 적용하였다.
- (2) 냉각방식은 Heat Pipe를 사용한 자연냉각방식을 사용하였다.
- (3) 사용소자는 3300V, 1200A급의 압접형 IGBT를 사용하여 신뢰성을 높였다.
- (4) 소형경량화, 소음 저감, 유지보수 등의 측면에서 유리한 IGBT Stack을 제작하였고, 부품의 교체가 용이한 구조를 갖도록 인버터 장치를 설계하였다.
- (5) 간접벡터제어방식을 적용하여 토크 응답특성을 개선하였다.
- (6) 조합시험을 통하여 제작된 인버터의 양호한 특성을 확인하였다.

### [참고문헌]

- [1] 한국철도기술연구원, 우진산전 “추진제어장치 연구개발 결과보고서”, 1998. 12
- [2] 이광주, 정만규, 고영철, 장성영, 방이석, “전동차용 고효율 저주파 동기 PWM을 이용한 관성부하시험”, 98한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp 233~240
- [3] Dong-Choon Lee, G-Myoung Lee, “A Novel Overmodulation Technique for Space-Vector PWM Inverters”, IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS. VOL. 13. NO. 6. NOVEMBER 1998.
- [4] 新井 静男, 菅谷 誠, 安藤 武, 安田 高司, 鈴木 優人, 仲田 清, 豊田 瑛一, “ベクトル制御の通勤電車駆動用 2レベル IGBT インバータへの適用”, 平成 9年 電気學會産業應用部門全國大會, pp 267~268
- [5] 新井 静男, 菅谷 誠, 仲田 清, 小澤 寛之, 堀江 哲, 金子 貴志, “3.3kV IGBT를 應用した通勤電車駆動用 2레벨 IGBT 인버터への開發”, 平成 9年 電気學會産業應用部門全國大會, pp 265~266