

전동차용 IGBT형 추진제어장치의 본선시험에 관한 연구

鄭萬圭, 高英鐵, 方利錫, 徐光德

A Study On Field Test of IGBT Type Propulsion System for Electric Railway

Man-Kyu Jeong Young-Cheol Ko Lee-Seok Bang Kwang-Duk Seo

요 약

본 논문은 전동차용 추진장치인 IGBT VVVF 인버터의 현차시험에 관한 것이다. IGBT VVVF인버터는 1,650kVA급으로 개발되었다. 추진 인버터의 신뢰성과 성능을 확인하기 위하여 서울시 지하철 6호선에서 본선시험을 하였다. 시험 차량구성은 4M4T로 구성되었으며, 전장품은 4대의 VVVF인버터, 16대의 견인전동기 및 2대의 SIV로 구성하였다. 추진장치는 1C4M으로 구성하였다. 현차시험을 통하여 추진용 인버터의 우수한 가·감속 능력과가가속도 특성 및 구배에서의 등판능력을 확인 할 수 있었다.

ABSTRACT

This paper describes the field test results of IGBT VVVF inverter for the railway propulsion system. The 1,650kVA IGBT VVVF inverter has been developed. Therefore, the field test is performed in SMG 6 Line to confirm its the reliability and performance. The train consists of 4M4T and the electrical equipment for field test are as follows : VVVF inverter 4 sets, 16 traction motors and 2 SIVs. The propulsion system is composed with 1C4M(1-Controller 4-Motors). The results of propulsion system which have the excellent acceleration/deceleration and the jerk characteristics as well as starting ability on slope are taken through the field test.

Key Words : IGBT VVVF inverter, 4M4T(4 Motor car 4 Trailer Car), Traction Motor, SIV(Static Inverter) Acceleration/Deceleration, Jerk characteristics, Starting ability on slope

1. 서 론

90년대, GTO형 PWM 인버터와 유도전동기로 구성된 전동차용 추진 시스템이 국내에 도입되어 운행되었다. 그러나 반도체 소자의 특성한계로 인해 인버터의 성능 향상에 제한을 보여 왔다. 90년대 후반에는 IGBT형 추진장치를 탑재한 전동차가 등장하게 된다. 그런데 현재 우리 나라의 지하철 추진장치는 대부분이 GTO형 PWM 인버터로 구성되어 있고, 추진장치는 외국의 기술에 의존하여 운영되고 있다. 최근 전력소자의 발달로 대용량 IGBT가 등장

하고, 새로운 개념의 교류 구동 시스템이 출현하게 되었다. 국내에서도 여러 기관에서 국산화 전동차에 관한 연구가 계속되어 왔다. 본 연구에서는 전동차용 IGBT형 VVVF 인버터 추진제어장치와 관련 전장품에 대한 현차시험을 수행한 결과를 보인다. 현차시험은 서울시 지하철 6호선 선로에서 진행하였다.

2. 6호선 현차시험 차량구성

시험차량은 그림1과 같이 4M4T의 8량 1편성으로

구성하였다. 전장품은 1,650kVA급 IGBT VVVF 인버터 4대, 190kVA급 2대의 보조전원장치 및 210kW 전동기 16대로 구성되었다. 그림2는 추진제어장치의 구성이다. 한 개의 인버터가 4개의 전동기(1C4M : 1-Controller 4-Motors)를 병렬로 일괄제어 하는 방식이다. 그림3은 시험차량의 모습이다. 그림4는 전동차에 취부한 IGBT형 VVVF인버터의 정면사진이다.

그림5는 Tc 차에 취부한 190kVA급의 IGBT형 SIV(Static Inverter)이다. 그림6은 M차에 취부된 210kW급의 견인전동기를 보인 것이다.

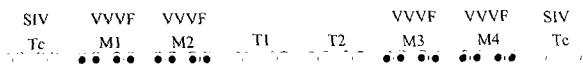


그림 1 6호선 전동차의 시스템 구성도
Fig. 1 System Configuration of SMG 6 Line Electric Locomotive

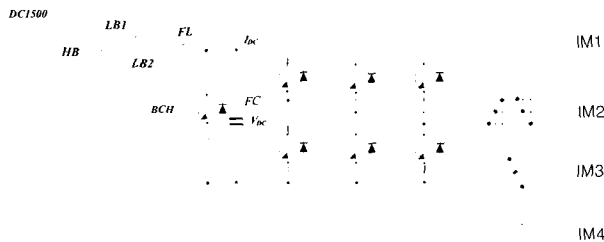


그림 2 추진장치의 구성
Fig. 2 Configuration of Propulsion system

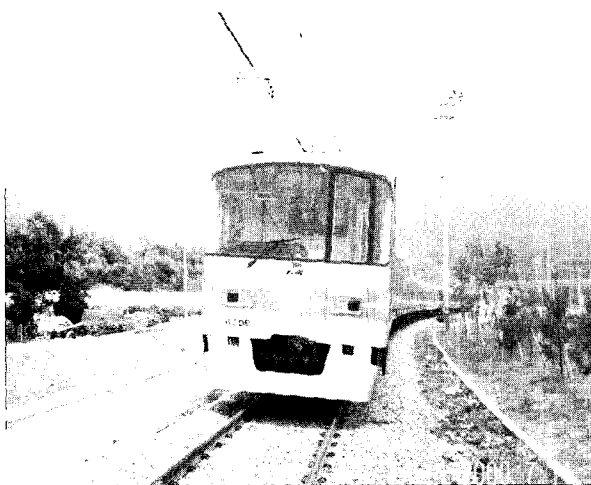


그림 3 시험 전동차의 사진
Fig. 3 Picture of test car

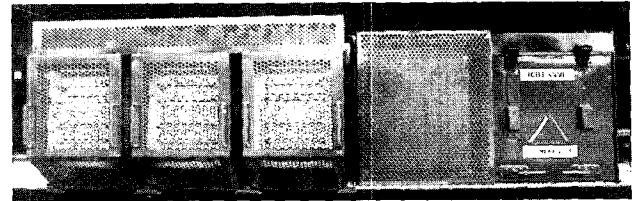


그림 4 IGBT VVVF 인버터(1,650kVA)
Fig. 4 IGBT VVVF Inverter(1,650kVA)

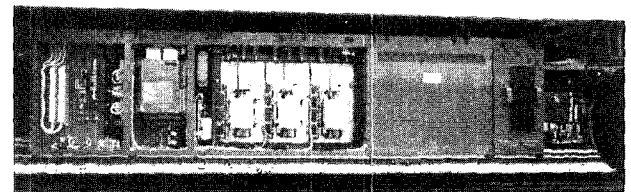


그림 5 IGBT SIV(190kVA)
Fig. 5 IGBT SIV(190kVA)

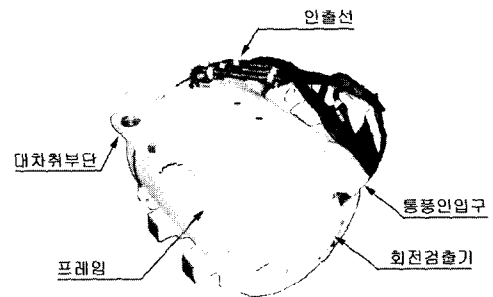


그림 6 견인전동기(210kW)
Fig. 6 Traction Motor(210kW)

3. 견인력 제어기법

개발된 추진시스템에 대한 견인력 제어기법으로는 기존의 슬립주파수제어, SPWM 변조기법에서 발생되는 여러 가지 문제점을 제거하기 위하여, 저주파 동기 과변조 방법 및 병렬운전 벡터제어기법을 적용하였다.

3.1 저주파 동기 과변조 PWM 방법

스위칭 주파수가 수 kHz로 높은 과변조기법은 지금까지 많은 연구가 되어왔다.^{[1][2]} 그러나 스위칭 주파수

가 수백 Hz로 제한되어 응용되는 전동차용 추진제어 장치에 대해서는 음색 전압과 위상 오차 분이 발생되지 않는 새로운 저주파 동기 과변조 PWM 방법이 필요하게 된다. 본 논문에서는 전구간에서 공간전압벡터에 의한 단일화된 과변조 알고리즘을 사용하고 저주파 스위칭으로 가장 간략하게 구현할 수 있는 저주파 동기 PWM 방법을 그림7과 같이 사용하였다.^{[3][4]} 여기서 x축은 변조지수(Modulation index)이고, y축은 스위칭 주파수이다.

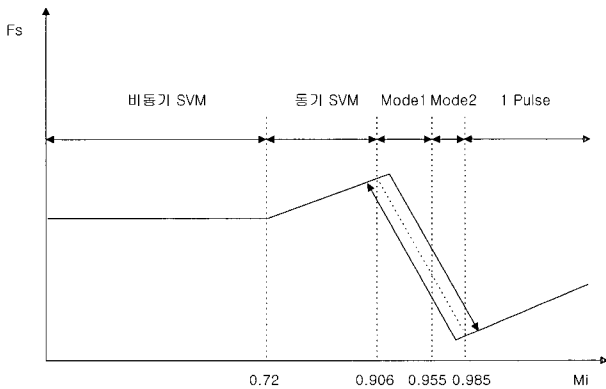


그림 7 제안된 저주파 동기 과변조 PWM 방법
 Fig. 7 Low switching synchronous over modulation PWM by Proposed Method

3.2 병렬운전 벡터제어

최근 차량의 경량화 및 견인부의 단위 체적당 출력의 증대로 견인력 제어가 점착 한계에 부딪히는 경우가 빈번하다. 또한 구배 기동을 위한 역상 운전, 입력 전압의 변화에 대한 출력제어성 향상과 가선측의 회생 전력 수전 한계에 대한 회생량의 제한 제어특성 등 추진장치에 대한 요구도 많아졌다. 따라서 새로운 고성능의 견인력 제어기법이 필요하게 되었다. 본 논문에서는 이러한 요구조건을 충족하기 위해 견인력 제어기법으로 벡터 제어기법을 적용하였다.^{[4][5]} 비록 4병렬 운전으로 인해 완벽한 벡터 제어를 구현하기는 어렵지만 상기의 사항들은 주로 저속에서 나타나는 현상이며, 저속에서는 병렬 접속된 전동기의 동작점의 차이가 적으므로 벡터제어 특성을 충분히 얻을 수 있기 때문이다. 그림 8은 견인력 제어 블록도를 보인 것이다.

운전식 마스콘의 토오크 지령치를 벡터제어를 수행하기 위한 동기좌표계 d,q축 전류로 변환을 하여 비례적분 전류제어와 역기전력을 보상한 d,q축 전압벡터를 저주파 동기 과변조 PWM방법을 적용하여 제어한다.

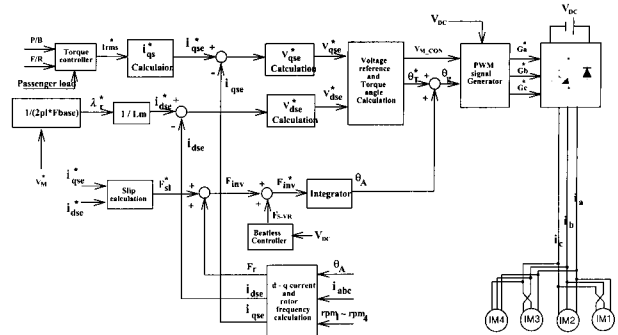


그림 8 추진장치의 견인력제어 블록 다이어그램
 Fig. 8 Traction control block diagram of propulsion system

좌표변환을 위한 θ_A 는 역행시는 4축중 낮은 주파수를 사용하여 구하고, 제동시는 4축중 높은 주파수를 사용하였다. 그리고 가선전압의 흔들림을 Beatless 제어를 사용하여 주파수 성분으로 보상하였다.

3.3 점착제어

점착제어는 바퀴와 레일 사이의 마찰력이 습기·먼지 등이 물질에 의해 제어 요구 견인력 보다 작아진 경우, 공전을 일으키지 않고 전달 가능한 최대 점착력인 마찰력으로 견인력을 제어하기 위한 것이다. 그림 9는 공전시 점착제어 알고리즘을 나타내었다. 그림과 같이 공전 감지가 선행되어야 하며, 공전을 감지하면 주어진 점착력 패턴을 감소시켜 점착제어를 수행한다. 공전이 소멸되면 재점착 감지에 따라 i_q^* 를 회복시켜 전동기 토오크를 제어치로 회복시킨다. 공전성분은 전동기 속도에서 저역필터로써 구한다.

$$i_q^* = K_v V_s + K_a \alpha_s \tag{1}$$

여기서 i_q^* 공전속도에 의한 전류감소치이며, K_v 는 공전속도 비례계인, V_s 는 공전속도, K_a 는 공전 가속도 비례계인, α_s 공전가속도이다.

견인력의 손실을 줄이기 위해 점착력 감소함수에 지수함수를 도입하고, 재공전 확률을 줄이기 위해 토오크 회복시 2단계로 회복한다. 식(1)에 의한 견인력 감소치는 4바퀴가 동시에 미끄러지는 대공전에 대해서는 효력을 발휘하지 못하므로 식(2)와 같이 전동기 속도로 부터 계산된 가속도 성분 α 와 차량가속도 기준치

α^* 의 차이를 점착제어 성분으로 제어하였다.

$$i_a^* = K (\alpha - \alpha^*) \quad (2)$$

여기서 K는 비례게인, α 는 차량 가속도, α^* 는 기준 차량가속도이다.

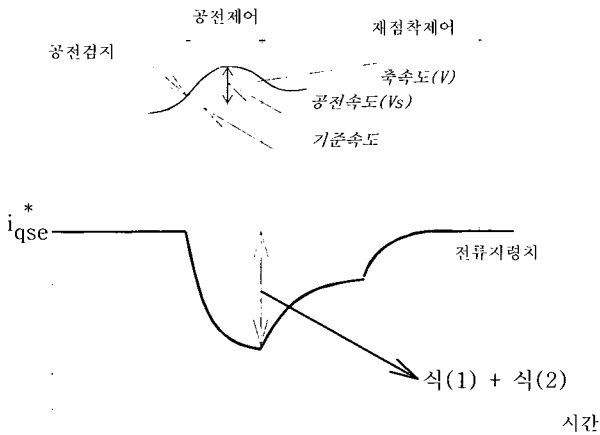
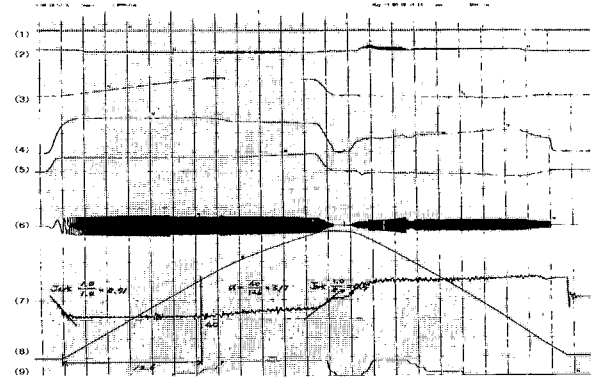


그림 9 점착제어 블록 다이어그램
Fig. 9 Adhesion control block diagram of propulsion system

4. 주행시험 결과

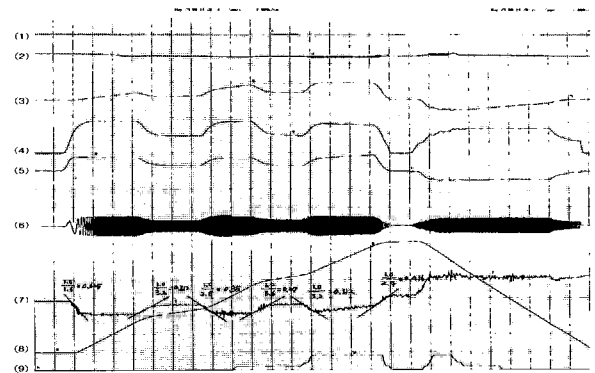
앞에서 설명한 저주파 동기 과변조 PWM제어를 포함한 병렬운전 벡터제어기법을 6호선 전동차에 적용하여 4개 편성차량이 동시에 운행되는 조건에서 주행시험을 하였다. 인버터의 성능은 가속능력, 감속능력, 승차감(Jerk) 및 구배 등판능력으로 판단된다. 그리고 회생시 가선전압 변동에 대하여 빠르게 응답하여 가선전압 상승 제한치를 초과하지 않도록 출력전류를 제한하는 제어가 중요시된다. 시험은 정상상태에서 PWM제어와 병렬 운전 벡터제어의 우수성 및 가감속 능력을 확인하기 위한 정격 가감속 운전, 회생 경부하와 회생 부하 변동시 제동특성, 구배기동 및 재점착제어 등에 대해 시험을 수행하였다.

그림 10은 정상 가속 운전 특성을 보이고 있다. 시속 65km/h 까지 가속후 타행으로 운전 64km/h에서 최대 감속 하였다. 가속도가 속도 0~40km/h 까지 3.17km/h/s이고, 출발시 찌크는 0.71m/s³, 노치 오프시 찌크는 0.5m/s³로 가속도 3.0km/h/s이상과 찌크(jerk) 0.8m/s³ 이하의 차량 성능 사양을 모두 만족하면서



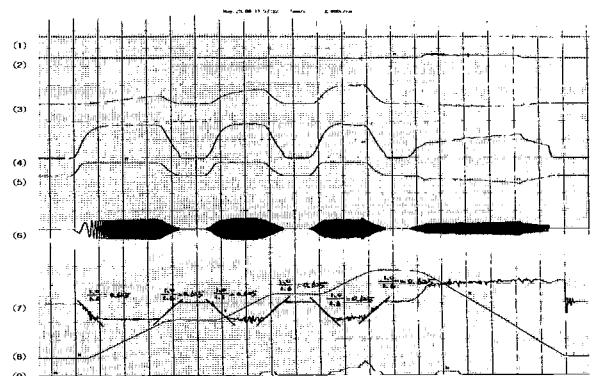
①가선전압 [1000V/div] ②필터전압 [1000V/div] ③가선입력전류[600A/div]
④실효전류 [300A/div] ⑤슬립주파수 [1.25Hz/div] ⑥순시전류 [3000A/div]
⑦가/감속도 [1m/s²/div] ⑧차량속도 [10km/h/div] ⑨PWM Mode

그림 10 가속도 시험(4N)
Fig. 10 Acceleration test(4N)



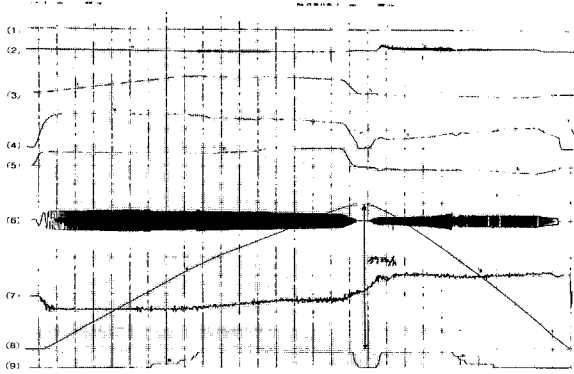
①가선전압 [1000V/div] ②필터전압 [1000V/div] ③가선입력전류[600A/div]
④실효전류 [300A/div] ⑤슬립주파수 [1.25Hz/div] ⑥순시전류 [3000A/div]
⑦가/감속도 [1m/s²/div] ⑧차량속도 [10km/h/div] ⑨PWM Mode

그림 11 역행시 가가속도 시험(4N→ 1N→ 4N)
Fig. 11 Jerk test of powering(4N→ 1N→ 4N)



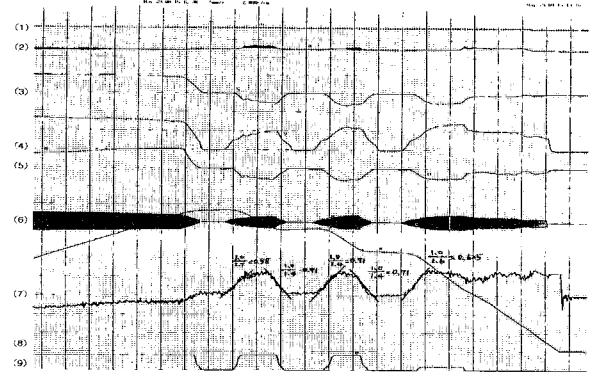
①가선전압 [1000V/div] ②필터전압 [1000V/div] ③가선입력전류[600A/div]
④실효전류 [300A/div] ⑤슬립주파수 [1.25Hz/div] ⑥순시전류 [3000A/div]
⑦가/감속도 [1m/s²/div] ⑧차량속도 [10km/h/div] ⑨PWM Mode

그림 12 역행시 가가속도 시험(4N→ off→ 4N)
Fig. 12 Jerk test of powering(4N→ off→ 4N)



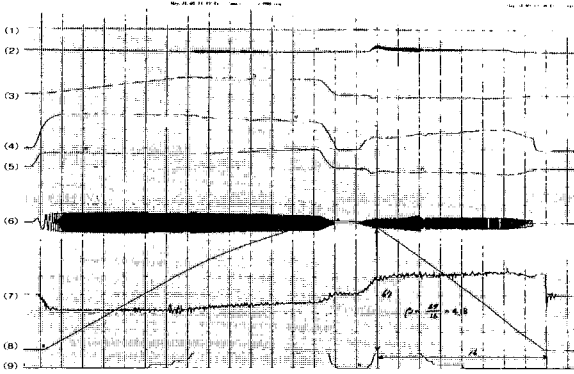
①가선전압 [1000V/div] ②필터전압 [1000V/div] ③가선입력전류[600A/div]
 ④선효전류 [300A/div] ⑤슬립주파수 [1.25Hz/div] ⑥순시전류 [3000A/div]
 ⑦가/감속도 [1m/s²/div] ⑧차량속도 [10km/h/div] ⑨PWM Mode

그림 13 최고속도 시험
 Fig. 13 High speed test



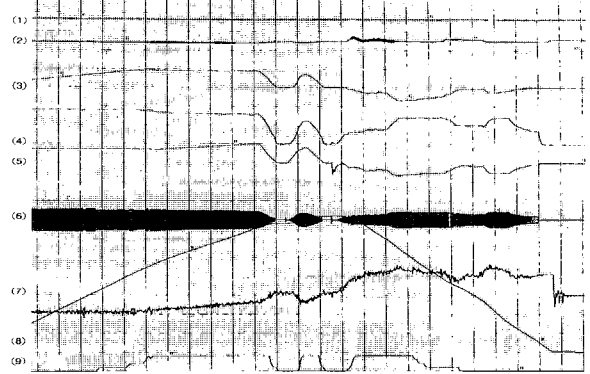
①가선전압 [1000V/div] ②필터전압 [1000V/div] ③가선입력전류[600A/div]
 ④선효전류 [300A/div] ⑤슬립주파수 [1.25Hz/div] ⑥순시전류 [3000A/div]
 ⑦가/감속도 [1m/s²/div] ⑧차량속도 [10km/h/div] ⑨PWM Mode

그림 16 제동시 가가속도 시험(7S→ off→ 7S)
 Fig. 16 Jerk test of braking(7S→ off→ 7S)



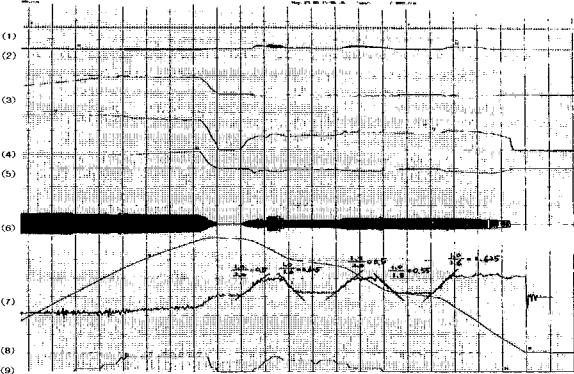
①가선전압 [1000V/div] ②필터전압 [1000V/div] ③가선입력전류[600A/div]
 ④선효전류 [300A/div] ⑤슬립주파수 [1.25Hz/div] ⑥순시전류 [3000A/div]
 ⑦가/감속도 [1m/s²/div] ⑧차량속도 [10km/h/div] ⑨PWM Mode

그림 14 감속도 시험(7S)
 Fig. 14 Deceleration test(7S)



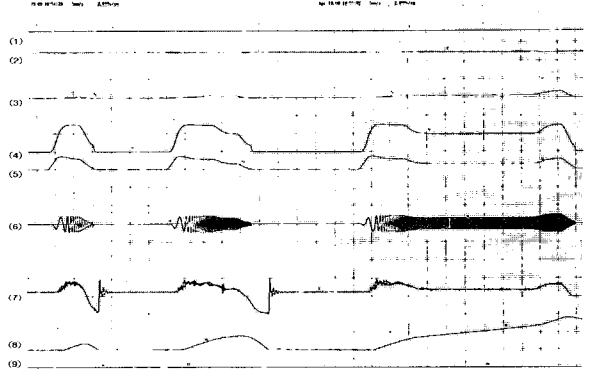
①가선전압 [1000V/div] ②필터전압 [1000V/div] ③가선입력전류[600A/div]
 ④선효전류 [300A/div] ⑤슬립주파수 [1.25Hz/div] ⑥순시전류 [3000A/div]
 ⑦가/감속도 [1m/s²/div] ⑧차량속도 [10km/h/div] ⑨PWM Mode

그림 17 제동시 회생부하변동시험
 Fig. 17 Regeneration load change test of braking



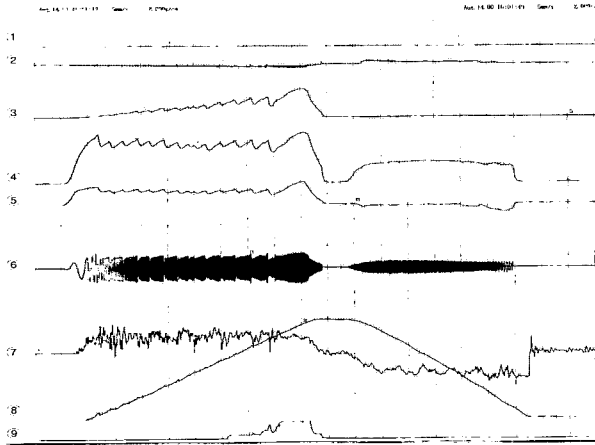
①가선전압 [1000V/div] ②필터전압 [1000V/div] ③가선입력전류[600A/div]
 ④선효전류 [300A/div] ⑤슬립주파수 [1.25Hz/div] ⑥순시전류 [3000A/div]
 ⑦가/감속도 [1m/s²/div] ⑧차량속도 [10km/h/div] ⑨PWM Mode

그림 15 제동시 가가속도 시험(7S→ 1S→ 7S)
 Fig. 15 Jerk test of braking(7S→ 1S→ 7S)



①가선전압 [1000V/div] ②필터전압 [1000V/div] ③가선입력전류[600A/div]
 ④선효전류 [300A/div] ⑤슬립주파수 [1.25Hz/div] ⑥순시전류 [3000A/div]
 ⑦가/감속도 [1m/s²/div] ⑧차량속도 [10km/h/div] ⑨PWM Mode

그림 18 구배 기동시험(33% 상구배)
 Fig. 18 Starting test of slope (33% upper slope)



①가선전압 [1000V/div] ②필터전압 [1000V/div] ③가선입력전류[600A/div]
 ④실효전류 [300A/div] ⑤슬립주파수 [1.25Hz/div] ⑥순시전류 [3000A/div]
 ⑦가/감속도 [1m/s²/div] ⑧차량속도 [10km/h/div] ⑨PWM Mode

그림 19 점착제어 시험
 Fig. 19 Adhesion control test

PWM모드 절체도 부드럽게 됨을 확인 할 수 있다.
 그림 11은 역행시 가속도 시험으로 역행 노치변화시(4N→1N→4N→1N→4N→1N) 승객이 느끼는 승차감에 대한 썩크 시험이다. 그림에서 보듯이 모두 썩크가 기준치인 0.8m/s³이하 안에 있음을 확인 할 수 있다. 여기서 4N은 최대 가속력(3.0km/h/s이상)을 낼 수 있는 견인력 요구치이다.

그림 12는 역행 노치 온·오프시(4N→off→4N→off→4N→off) 승객이 느끼는 승차감에 대한 썩크 시험으로 그림에서 보듯이 모두 썩크가 기준치인 0.8m/s³이하 안에 있음을 확인 할 수 있다.

그림 13은 최고속도 시험이다. 지하철 상업운전 최고 속도인 80km/h 선로구간에서 79km/h까지 시험하였다. 80km/h이상내면 ATC FSB가 걸리기 때문에 79km/h까지만 시험하였다.

그림 14는 회생 경부하시 감속도를 측정된 결과이다. 감속도가 4.18km/h/s로 기준치인 3.5km/h/s이상을 만족하고 있다. 시험시 4개의 편성차량이 시험선로에 있었지만 회생부하를 소비하는 차가 적었기 때문에 출력전류를 콘덴서전압이 1750V를 넘지 않도록 제한했다.

그림 15는 회생 스텝 변화시 (7S→1S→7S→1S→7S) 승객이 느끼는 승차감에 대한 썩크 시험으로 그림에서 보듯이 모두 썩크가 기준치인 0.8m/s³이하 안에 있음을 확인 할 수 있다. 또한 그림15는 회생 경부하에 대한 썩크 변화시험이 되었다. 여기서 7S는 최대 감속력(3.5km/h/s이상)을 낼 수 있는 제동력 요구치이다.

그림 16은 회생 스텝 온·오프시(7S→off→7S→off→7S) 승객이 느끼는 승차감에 대한 썩크 시험으로 그림에서 보듯이 모두 썩크가 기준치인 0.8m/s³이하 안에 있음을 확인 할 수 있다. 또한 그림16은 회생부하 변동에 대한 썩크 변화시험이 되었다.

그림 17은 회생 제동시 회생부하변동시험이다. 시속 73km/h에서 제동 7스텝 명령을 주었다. 회생전력을 소비 시켜주는 차량이 시속 60km/h지점에서 발생했다가 시속 40km/h지점에서 없다가 다시 시속 28km/h지점에서 다시 발생하여 회생전력을 소비시켜 주었다. 회생부하변동에 대하여 가선전압 제한치를 초과하지 않도록 출력전류를 제한하는 제어가 잘 동작함을 확인 할 수 있었다. 주행 시험시 회생제동은 경부하 또는 회생부하변동이 주를 이루는 과도상태가 계속해서 발생하였다.

그림 18은 구배 등판능력 시험이다. 구배가 33%인 경사면에서 역행 1노치로 차량을 기동하여 시속 3km/h지점에서 노치 오프 후 차량이 뒤로 밀리는지 시험을 한 후 다시 1노치로 기동하여 시속 8km/h지점에서 다시 노치 오프 하여 역시 차량이 밀리는 지를 시험 한 후 다시 1노치로 기동하여 구배 등판능력을 시험하였다. 최소 1노치에서도 33%인 경사면을 차량이 뒤로 밀리지 않으면서 기동함을 확인 할 수 있었다.

그림 19는 점착제어시험 파형이다. 7호차의 1축바퀴에 살수하면서 시험하였다. 물에 의하여 바퀴와 레일 사이의 마찰력이 감소하여 차량의 속도가 급격히 증가하면 공전을 검지하여 q축 전류지령치를 패턴에 의하여 감소한다. 그런 다음 q축 전류지령치를 증가시키면 다시 공전이 발생하여 또다시 q축 전류지령치를 패턴에 의하여 감소한다. 이러한 동작이 계속되고 살수동작을 멈추면 원래의 전류지령치로 회복되는 곳을 확인 할 수 있었다.

이상과 같이 8량 4개 편성 차량이 동시에 운행되는 6호선 주행선로에서 외국제품의 차량과 같이 주행시험을 실시한 결과 차량이 우수한 성능을 발휘하는 것을 확인 할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 6호선 전동차에 IGBT형 VVVF 인버터를 채택하여, 이미 제시한 저주파동기 PWM방법과 병렬운전 백터제어기법과 재점착제어를 적용하여, 4개 편성의 차량이 동시에 운행되는 시험선로에서 상업영

업 운전시 발생하는 가선전압의 변동, 선로의 구배 조건, 회생제동시 다른 차량의 회생제동으로 인한 가선전압의 급변 및 완변 상태에 대하여 주행시험을 하였다. 상업 영업운전에서 발생 될 수 있는 모든 상태에서 안정적인 가감속 특성과 승차감이 차량의 성능 사양조건을 만족함을 확인 할 수 있었다. 이로써 국산화된 전동차용 추진제어장치를 독자적으로 완성 할 수 있었다. 그러므로 추가로 건설되는 지하철에 국산화된 추진제어장치를 적용 할 수 있고, 현재 운행중인 지하철의 추가 물량에도 국산화된 추진시스템을 납품 할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 주행시험을 통하여 확보된 추진제어장치 견인력 제어 기술은 경전철 및 현재 국책과제로 진행중인 고속전철의 추진시스템 개발에도 적용되어 큰 도움이 될 것으로 본다.

참 고 문 헌

[1] J.Holtz, W.Lotzat,and A.M. Khambadkone,"On Continuous Control of PWM Inverter in the Overmodulation Range Including the Six-step Mode", Trans. IEEE. on PE, Vol. 8, No.4, pp.546-553, 1993.

[2] 이지명,이동춘,최종우,"PWM인버터의 과변조 제어 기법", Trans. KIEE. Vol.46. No.5., pp712-719,1997.5.

[3] K.J. Lee, M.K. Jeong, L.S. Bang, K.D. Seo, N.H.Kim,"A Study on the High Performance PWM Technique for a Propulsion System of Railway", Proceedings ICPE'98, pp425-430,1998.

[4] 정만규,서광덕," 관성부하를 이용한 전동차 추진용 VVVF 인버터의 모의주행 및 과도상태시험". 전력전자학회 논문지,제4권,제6호,pp491~499,1999.12.

[5] D.W.Novotny and T.A.Lipo ,Vector Control of Dynamics of AC Drives, Oxford University Press Inc., New York, pp257-268.

저 자 소 개



정만규(鄭萬圭)

1967년 3월 1일생. 1990년 건국대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1994년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년~현재 현대중공업 기전연구소 산업전자연구실 연구1급 연구원



고영철(高英鐵)

1965년 7월 14일생. 1992년 인하대학교 전자공학과 졸업(학사). 1992년~현재 현대중공업 기전연구소 산업전자연구실 선임 연구원



방이석(方利錫)

1963년 1월 22일생. 1986년 명지대학교 전기공학과 졸업(학사). 1988년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년~현재 현대중공업 기전연구소 산업전자연구실 선임 연구원



서광덕(徐光德)

1964년 2월 22일생. 1986년 부산대학교 전기공학과 졸업(학사). 1989년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 현대 중공업 기전연구소 산업전자연구실 책임 연구원.