

국산화 전동차 광주시철도 1호선 추진 제어장치의 본선 시운전에 관한 연구

정만규, 박건태, 김연달, 방이석
현대중공업 기계전기연구소

A Study on the Main Line Test of Propulsion Control System for Kwang-Ju Line 1

Man-Kyu Jeong, Geon-Tae-Park, Yeon-Dal Kim, Lee-Seok Bang
Electro-Mechanical Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.

ABSTRACT

본 연구는 순수 국내기술로 개발된 국산화 전동차 광주시철도 1호선의 추진제어 장치의 본선시운전에 관한 것으로, 외국기술에 의존해온 추진 제어장치를 국내기술로 설계하고 본선시운전을 통하여 추진제어장치의 신뢰성 및 안정성에 관하여 실험을 실시하였다. 그리고 추진 제어 장치에 적용한 알고리즘은 필터 사이즈를 감소하기 위하여 기존의 패턴에 의한 PWM방식을 사용하지 않고, 출력전류의 고조파 리플이 적은 저주파 동기 공간벡터 PWM 알고리즘을 제안하고, 가선전압의 변동에 강인한 댐핑 제어 및 과전압 제한 제어 알고리즘을 제시하고, 제안된 알고리즘은 본선시운전을 통하여 타당함을 확인하였다.

1. 서 론

현재 국내의 전동차용 추진제어 장치는 서울시 1호선을 시작으로 현재는 8호선까지 운행이 되고 있고, 부산시 1, 2호선, 대구시 1호선 및 인천시 1호선이 운행되고 있다. 그러나 이러한 추진 제어장치는 외국기술에 의존되어 유지보수에 어려움을 겪고 있고, 매년 수리비용도 크게 증가하고 있다. 그리고 GTO를 사용한 추진제어 장치가 대부분이고, 최근에 인천시 1호선, 서울시 6호선과 서울시 7, 8호선 추가 물량에 IGBT를 사용한 추진제어 장치가 사용되고 있다. IGBT형 추진 제어장치는 GTO형 추진 제어장치에 비하여 부피와 무게 면에서 크게 유리한 점을 가지고 있다. 당사는 서울시 6호선에 IGBT형 추진 제어장치, 견인전동기 및 SIV를 개발하여 3년간의 운행실적을 확보한 기술력으로 광주시철도 1호선을 국내 최초로 수주하여 본선시운전을 거쳐 현재 1년간의 영업운행실적을 가지고 있다. 본 논문에서는 본선시운전을 하면서 연구한 알고리즘 및 실험 결과를 통하여 최초로 국산화된 추진제어장치의 우수성과 안정성을 소개하고자 한다.

2. 추진 제어장치의 견인력제어 알고리즘

2.1 저주파 동기 공간전압벡터 알고리즘^[1~4]

추진인버터의 전압변조 방식으로 저주파 동기 공간벡터 PWM 알고리즘은 공간벡터 변조 방식과 동기 PWM 변조방식을 접목한 것으로 500Hz 미만인 대용량 추진제어장치에 알맞은 PWM 방식이다. 비동기 모드에서는 공간벡터변조방식을 사용하고, 변조지수(M_i)가 0.72이상에서 동기 PWM으로 전환하여 출력전압을 변조한다. 공간벡터 변조방식의 선형영역을 벗어난 과변조 영역에서는 과변조 모드 1, 과변조 모드 2를 거쳐 1펄스모드로 전환하여 인버터의 전압을 변조한다. 이러한 방식은 차량의 경량화를 위하여 DC링크 전압을 최대에 이용하는 전동차용 추진제어 장치에 필요한 과변조방식이다.

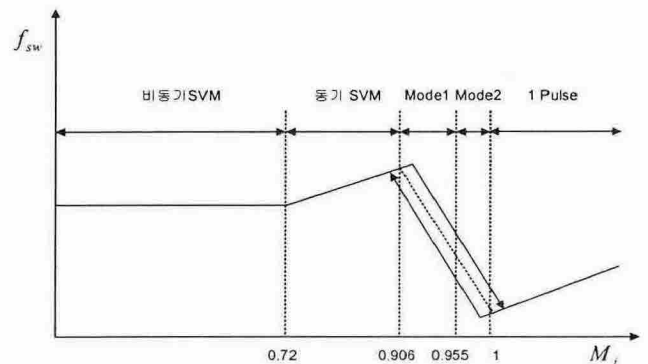


그림 1 저주파 동기 공간벡터 PWM 알고리즘

2.2 댐핑 제어 알고리즘

스위칭 주파수가 낮은 추진제어장치의 출력전압은 DC 링크 전압의 리플성분으로 인하여 동기, 과변조모드, 1펄스모드에서 출력전압이 그림과 같이 2분파대칭이 성립하지 않으므로 스위칭 주파수의 주기(T_s)을 변경하여 2분파대칭이 되도록 하는 것이 중요하다. 이러한 제어 방법을 댐핑제어 혹은 Beatless 제어라 한다. 그림 2와 같

은 알고리즘을 사용하여 출력전압의 2분과대칭을 확립한다.

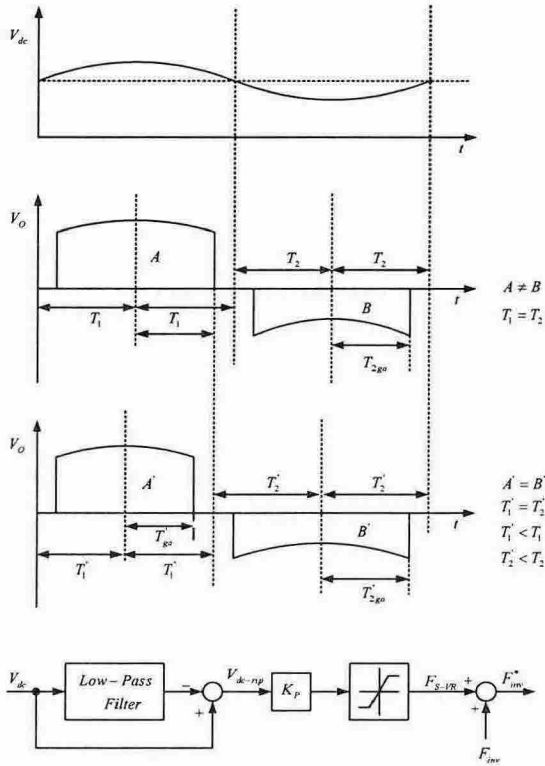


그림2 댐핑 제어 알고리즘

2.3 과전압제한 제어 알고리즘

회생 시 회생부하 차량이 경부하 또는 없는 상태에서 회생을 하면 추진제어장치의 필터 콘덴서전압이 상승하여 과전압 고장(2000[V]이상)이 발생한다.

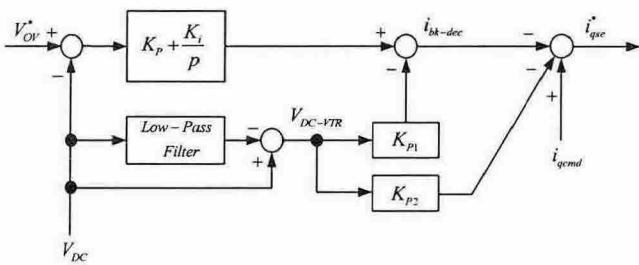


그림3 과전압제한제어 알고리즘

이를 방지하기 위하여 제동시 출력전류를 제한하여 과전압이 발생치 않도록 하는 제어가 과전압제한제어이다. 이는 운행 차량이 적은 중소 도시에서 가선전압이 회생 차량에 의하여 급변하는 시간에 필요한 제어알고리즘이다. 제어 알고리즘은 그림3과 같이 표현된다.

3. 추진 제어장치 본선시운전

추진제어 장치의 성능과 제안한 알고리즘을 확인하기 위

하여 본선시운전을 도시철도법에 근거하여 광주도시 철도 1호선 본선에서 시험을 실시하였다. 시험 항목은 표 1과 같다. 표1은 만차 시 시험 항목이다. 본 논문에서는 공차와 만차 상태시험이 같으므로 만차 시험만 논의한다.

표1 만차 시 시험 항목

시험구분	시험항목	시험결과
역행 및 제역행시험	1N→10km/h→OFF→B1→0km/h	양호
	1N→20km/h→OFF→B5→0km/h	양호
	2N→20km/h→OFF→B5→0km/h	양호
	3N→20km/h→OFF→B7→0km/h	양호
	4N→1N→4N→1N→4N→B7→0km/h	양호
	1N→10km/h→2N→20km/h→3N→ATC 최대속도→B7→0km/h	양호
	2N→15km/h→4N→ATC 최대속도→B7→0km/h	양호
	1N→2N→4N→B7→0km/h	양호
	3N→ATC 최대속도→B7→0km/h	양호
	4N→ATC 최대속도→B7→0km/h	양호
가속도 시험	4N→40km/h→OFF→B7→0km/h	양호
지크 측정시험	4N→1N→4N→1N→4N→1N→4N→B7→0km/h	양호
	4N→OFF→4N→OFF→4N→OFF→4N→OFF→4N→B7→0km/h	양호
후진시험	1N→10km/h→OFF→B1→0km/h	양호
	1N→20km/h→OFF→B5→0km/h	양호
	2N→20km/h→OFF→B5→0km/h	양호
점착성능시험		양호
구배기동시험		양호
과부하시험		양호
순간정전시험		양호
최고속도시험	4N→최고속도→OFF→B7→0km/h	양호
회생제동 한계제어		양호
지크한계 측정시험		양호
개방시험	4N→10km/h→OFF→4N→40km/h→OFF→B7→0km/h	양호
	4N→30km/h→OFF→4N→40km/h→OFF→B7→0km/h	양호
	4N→구내 MAX→OFF→B7→30km/h→OFF→4N→구내 MAX→OFF→B7→0km/h	양호
회생제동시험	30km/h→OFF→B1→0km/h	양호
	40km/h→OFF→B3→0km/h	양호
	50km/h→OFF→B7→0km/h	양호
	회생제동 중 부하차단	양호
	회생제동 중 부하투입	양호
감속도시험	4N→60km/h→OFF→B7→0km/h	양호
회생제동중 정전시험		양호

그림 4는 가속도 시험 파형이다. 0~40km/h 까지 가속도가 3.0km/h/s 이상이면 차량성능사양을 만족한다. 측정결과 3.05로 만족함을 확인할 수 있다.

그림5는 승차감시험으로 Jerk 기준치 0.8m/s³ 이하면 만족이다. 측정결과 최대 0.71m/s³ 로 Jerk 기준치를 만족하고 있다.

그림6은 최고속도시험이다. 최고속도 85km/h까지 가속한 파형이다. 최고속도는 80km/h 이상이다.

그림7은 회생제동한계시험으로 회생부하 부족시 제동 초과 동작을 확인하는 시험파형이다. 측정결과 제동 초과가 1850V 이상에서 동작하였다.

그림8은 Jerk 한계측정시험으로 살수조건에서 바퀴의 공저울 검지하여 재점착 제어를 수행하고 노치 오프 후, 비 살수 조건에서 노치 온시 정상적으로 Jerk가 0.8m/s³ 이하가 되는지를 확인하는 시험이다. 살수조건에서 재점착 제어가 수행되었고, 비 살수 조건에서는 Jerk 값이 측정결과 0.55m/s³ 로 기준치를 만족하고 있다.

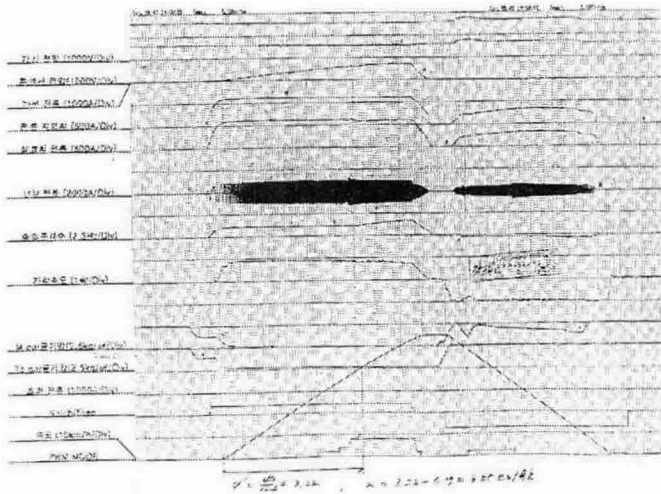


그림4 가속도 시험

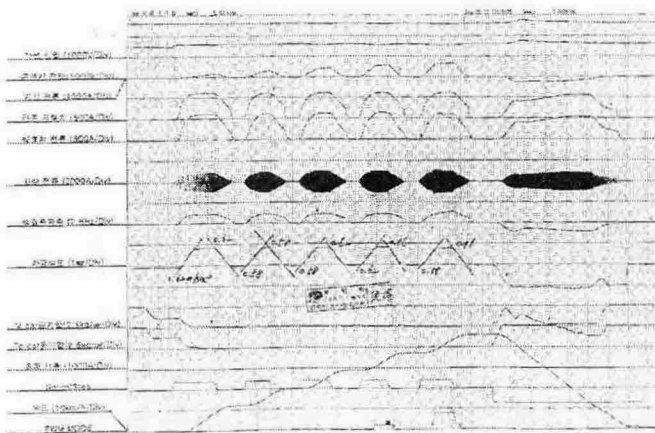


그림5 Jerk 측정 시험

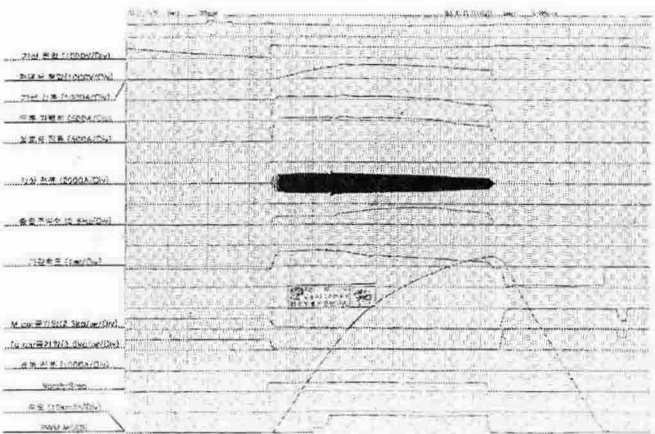


그림6 최고속도 시험

4. 결론

광주도시 철도1호선에 추진제어장치의 본선시험을 통하여 추진제어장치의 견인력제어 알고리즘인 저주파 동기 공간벡터 PWM 알고리즘, 댐핑 제어 알고리즘, 과전압제한제어 알고리즘의 우수성과 타당성을 확인 할 수 있었다.

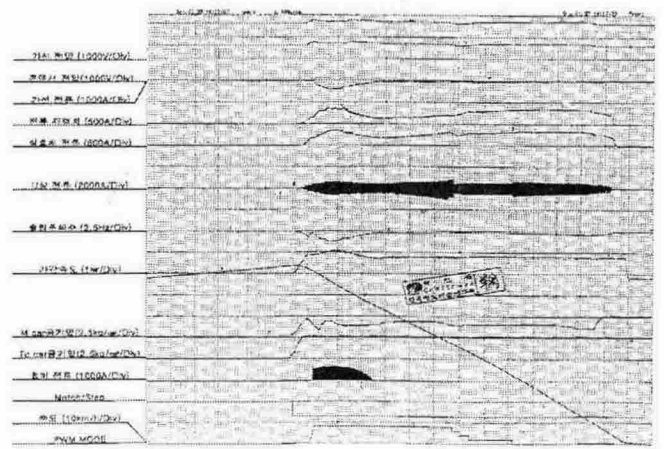


그림7 회생제동 한계 시험

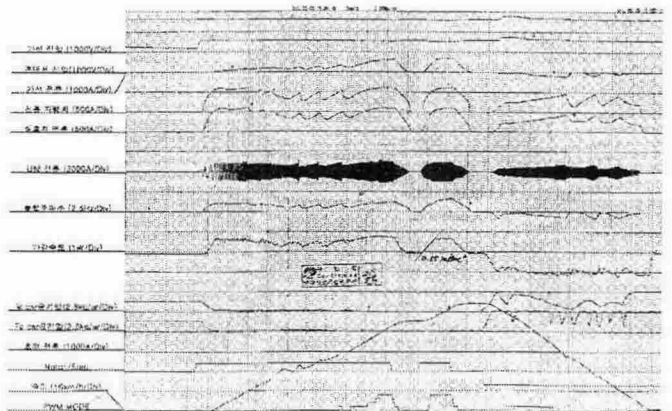


그림8 Jerk 한계 측정 시험

이로서 외국기술에 의존하지 않고, 국내기술로 전동차용 추진 제어장치를 개발한 것은 실로 우수한 성과라고 할 수 있다. 본 논문에서 제시한 알고리즘은 현재 한국형 고속전철에도 탑재되어 시험 운영을 계속하고 있다.

참 고 문 헌

- [1] J. Holtz, W. Lotz, 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] 정만규, 서광덕, "관성부하를 이용한 전동차 추진용 VVVF 인버터의 모의주행 및 과도상태시험". 전력 전자학회 논문지, 제4권, 제6호, pp491~499, 1999.12.
- [4] 정만규, 고영철, 방이석, 서광덕, "전동차용 IGBT형 추진제어장치의 본선시험에 관한 연구". 전력 전자학회 논문지, 제5권, 제5호, pp515~521, 2000.10.