

전동차용 PMSM 추진제어장치 개발

정만규, 서정우, 노애숙, 김동명, 정은성
현대로템(주)

Development of PMSM Propulsion Control System for Electric Train

Man-Kyu Jeong, Jung-Woo Suh, Ae-Suk Kno, Dong-Myung Kim, Eun-Sung Chung
Power System Team/R&D Center

ABSTRACT

지구온난화와 같은 환경적 문제점들로 인해 에너지 저감 및 고효율의 기술개발을 통한 탄소 저감이 주목을 받고 있다. 시대적 관심과 요구에 맞춰 에너지 저감 효과가 있는 영구자석 동기 전동기 등의 신기술을 철도차량에 적용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. PMSM을 철도차량에 적용하기 위해 추진 제어장치는 인버터 한 대가 한 대의 전동기를 제어하는 1CIM 방식이어야 하며, 유지보수성과 안정성을 확보하기 위해 전동기와 인버터 사이를 전기적으로 분리해줄 수 있는 차단기가 필요하다. 또한 에너지 저감과 고효율을 달성하기 위해서 추진 제어장치는 소형, 경량화 구조로 개발 되어야 한다.

1. 서론

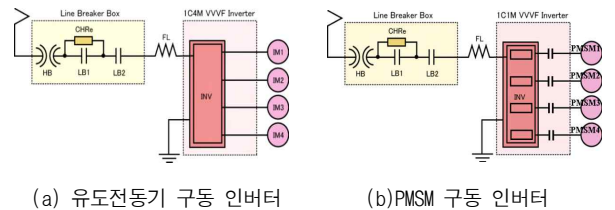
1990년대, GTO형 PWM 인버터와 유도전동기로 구성된 전동차용 추진시스템이 국내에 도입되어 운행되었다. 그러나 반도체 소자의 특성 한계로 인해 인버터의 성능 향상에 제한을 보여 왔다. 1990년대 후반에는 IGBT형 추진제어장치를 탑재한 전동차가 등장하게 된다. 현재도 우리나라의 지하철 추진제어장치는 GTO형 PWM 인버터로 구성된 차량이 일부 운행되고 있다. 2000년대 초 전력소자의 발달로 대용량의 IGBT가 등장하고, 3300V/1200A 급 IGBT와 유도전동기를 사용한 새로운 추진제어장치가 국산화 개발이 되었다.^{[1][2]} 현재 전동차에 대한 추진제어장치는 안정화 단계에 접어들었다. 세계적으로 관심 있는 에너지 절감과 고객의 요구 사항과 일치하여 전동차 운행 시 소비전력량을 절감하는 방향의 연구가 선진국 및 국내에서 진행되고 있다. 국내에서는 2017년에 부산시 1호선 40량에 도시바사의 PMSM 추진제어장치가 적용되었다. 이에 국산화의 요구 증대로 PMSM 추진제어장치를 로템과 서울교통공사가 공동으로 개발하여 서울시 6호선 본선 선로에서 시험을 진행하였다.

2. 본론

2.1 추진제어장치 구성

그림 1은 추진제어장치의 종류를 나타내고 있다. 그림 1(a)는 유도전동기 구동 추진제어장치를 나타내고 있다. 1개의 인버터가 4개의 전동기를 일괄(1C4M)로 제어한다. 회로가 간단하다는 장점으로 유도전동기 구동에 많이 사용되어 왔다. 그림

1(b)의 PMSM 구동 추진제어장치는 4개의 인버터가 각각 1대의 전동기를 개별(1CIM)로 제어하는 구조이다. PMSM 구동시에는 PMSM의 위상각이 모두 다르므로 각각의 인버터가 각각의 PMSM를 개별적으로 제어해야 한다. 그림 2에 PMSM 구동 추진제어장치의 주회로 구성을 나타내었다. 추진 인버터장치에는 인버터 유니트 1대, 필터캐패시터 1대, 모터개방 접촉기(MCOK)4대, 제어유니트 1대, 릴레이 유니트 등으로 구성된다. 인버터 유니트는 소형경량화를 위하여 독립된 인버터 회로 4회로를 내장하고 있고, 영구자석동기전동기를(PMSM)을 개별로 제어한다. 인버터 유니트에 적용되는 IGBT소자는 1패키지 내부에 독립된 2회로를 포함하여, 1소자로 인버터 1상을 구성한다. 하나의 인버터 회로는 3개의 IGBT 패키지로 구성되며, 4회로를 포함한 인버터는 유니트는 12개의 IGBT 패키지로 구성된다. 선로차단기(LB BOX)와 필터리액터(FL)는 서울시 6호선 전동차에 취부된 장치를 그대로 사용하였다.



(a) 유도전동기 구동 인버터 (b) PMSM 구동 인버터

그림 1 추진제어장치 종류

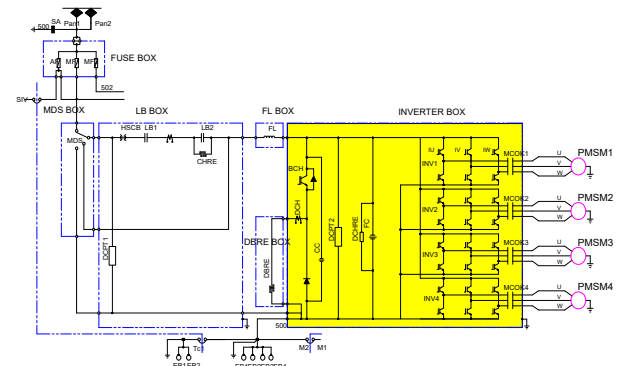


그림 2 추진제어장치의 구성

그림 3은 인버터의 전면부를 나타내고 있다. 좌측에는 제어가 위치하고 우측에는 모터개방 접촉기가 위치하고 있다. 중

양에는 IGBT를 냉각시키는 히트파이프 블록이 위치한다. 히트파이프 블록 뒤에 IGBT가 부착되어 인버터 회로를 구성하고 있다. 표 1에 개발된 추진제어장치의 사양을 나타내었다. 기존 유도전동기 구동 사양과 비슷하다. 다른 점은 6극의 PMSM를 구동하기 위하여 인버터의 출력주파수가 1.5배 증가 하였다. 추진제어장치의 경량화를 위하여 알루미늄 박스를 사용하였다. 경쟁사 모델보다 중량을 18% 저감 하였다.



그림 3 인버터 전면부

표 1 추진제어장치 사양

항목	성능	비고
정격전압	DC 1,500V	
전압변동범위	DC900~1,800V	
연속정격 용량	1,100kVA	
최대용량	1,640kVA(410*4)	
출력전압	AC 0~1,100V	
출력주파수	0~250Hz	
냉각방식	자연냉각방식	
견인전동기	3상, 6극 210kW PMSM	
인버터 중량	540kg(로템)	660kg(도시바)

2.2 추진제어장치 시험

개발된 추진제어장치는 6호선 본선에서 시험을 실시하였으며, 시험 항목은 철도차량 기술기준 Part51에 의거하여 실시하였다. 그림 4은 시험 차량 편성을 나타내고 있다. 8량 편성 M3카(6호차)의 유도전동기/인버터(미쯔비시사 제조)를 개발된 PMSM과 추진제어장치로 교체하여 시험을 실시하였다. 그림 5는 개발된 추진제어장치를 6호선 33편성 6호차(600대)에 취부한 사진이다. 그림 6는 추진제어장치의 벡터제어 알고리즘이다.^[3] 운전석의 견인력 지령을 최대토크(MTPA)를 발생하는 전류지령치로 변환하여 동기좌표계 PI 전류제어를 사용하여 제어한다. 레졸버센서의 위치를 위상각으로 변환하여 좌표변환에 사용한다. 전압지령치는 공간전압벡터변조를 이용하여 PWM 신호를 발생한다.

만차시험은 각 차량에 승객을 가상한 20Ton의 물통을 적재한 후 실시 한다. 그림 7은 만차상태에서 가속도 측정 시험 파형이다. 추진제어장치의 가속 성능을 측정하는 시험으로 가장 중요한 시험이다. 가속도는 5km/h~35km/h 까지 측정한다. 3.0km/h/s를 만족하는 것을 확인할 수 있다. 그림 8은 만차상태에서 최고속도 시험 파형이다. 기준치인 80km/h 이상 속도를 만족시켰다.

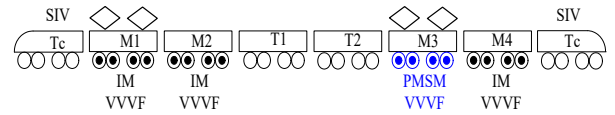


그림 4 시험 차량 편성



그림 5 추진제어장치 차량 취부 모습

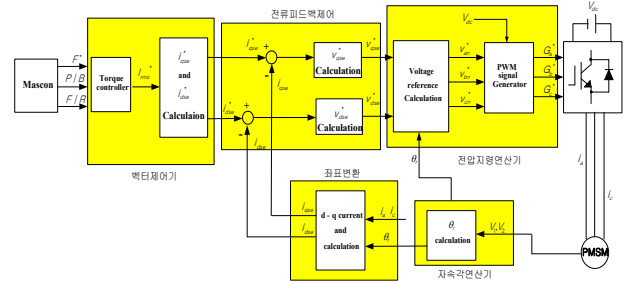


그림 6 추진제어장치 제어 알고리즘

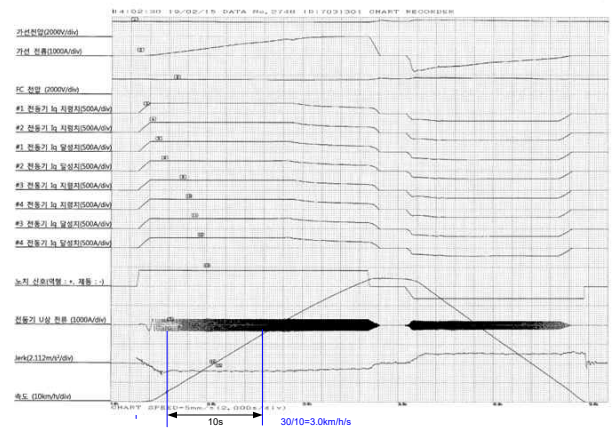


그림 7 만차 가속도 시험

6호선 본선(봉화산↔공덕)에서 자동운전으로 2회 왕복 소비 전력량 측정 시험을 실시하였다. 표 2는 각 호차의 소비 전력량이다. 개발된 인버터는 6호차에 취부 되었다.

표 2는 6호차를 기준으로 각 호차의 소비전력량의 차이를 각 호차의 소비전력량으로 나누어서 6호차가 절감한 소비전력량을 효율로 나타내었다. PMSM이 취부된 6호차는 7호차 대비 29%의 에너지를 절감하고 있다. 표 3은 6개월 동안 상업운전을 실시하였을 때 소모된 소비전력량을 비교 하였다. PMSM이 취부된 6호차는 7호차 대비 37.5%의 에너지를 절감하고 있다. 개발된 추진제어장치에서 발생하는 소음을 기존 인버터와

비교하기 위하여 차량 내부의 대차 상부 1.6m에서 소음을 측정하였다. 그림 9는 소음을 측정하는 장면을 나타내고 있다. 이를 표 4에 나타내었다. 30km/h까지 가속시 12dBA, 30km/h에서 감속시는 11dBA의 소음이 감소 하였고, 70km/h에서는 3dBA가 감소 하였다. 그림 10에 유도전동기와 PMSM이 장착된 Mcar와 구동축이 없는 Tcar와의 소음비교를 나타 내었다. 속도 60km/h 이상에서는 PMSM이 장착된 Mcar의 소음과 Tcar의 소음이 동등 수준으로 측정되어 소음적으로 쾌적한 승차감을 느낄 수 있었다. 개발된 PMSM 전동기가 전폐형이라 소음이 크게 감소한 것으로 판단된다.

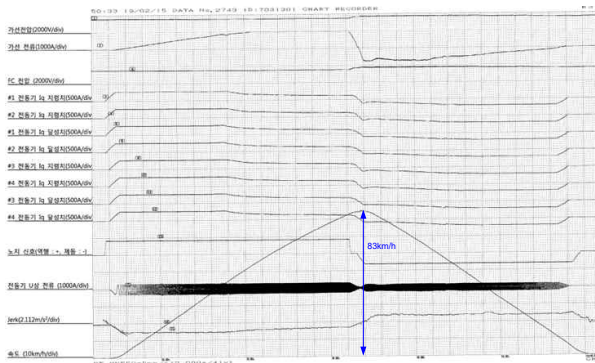


그림 8 최고속도 시험

표 2 전력량 및 효율(2회 왕복 운전시)

구분	2호차 (IM)	3호차 (IM)	6호차 (PMSM)	7호차 (IM)	
					역행전력
전력량 [kWh]	회생전력	280	253	313	265
	소비전력	355	380	263	371
	계산	92/355	117/380		108/371
효율	효율[%]	26	31		29

표 3 전력량 및 효율(6개월 상업 운전시)

구분	2호차 (IM)	3호차 (IM)	6호차 (PMSM)	7호차 (IM)	
					역행전력
전력량 [kWh]	회생전력	57590	53048	56546	54669
	소비전력	76739	76933	50594	80932
	계산	26145/76739	26339/76933		30338/80932
효율	효율[%]	34.1	34.2		37.5

표 4 기존 추진제어장치와 소음비교

속도 [km/h]	구분	6호차 소음[dBA] (PMSM:로템)	7호차 소음[dBA] (IM:미쯔비시)	차이
70	정속	77	80	-3
60	정속	73	77	-4
50	정속	72	75	-3
0~30	가속	63	75	-12
30~0	감속	63	74	-11



그림 9 소음 측정

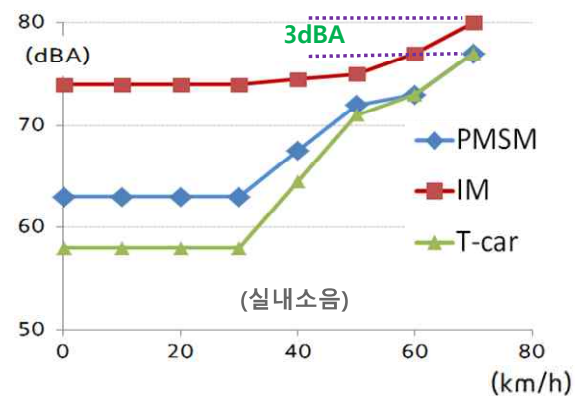


그림 10 Mcar(유도전동기,PMSM) 및 Tcar 소음비교

3. 결론

에너지 저감과 추진제어장치의 경량화 요구 조건에 맞추어 PMSM 추진제어장치를 개발하였고, 서울시 6호선에서 본선 시운전을 실시하여 Part51의 시험조건을 모두 만족 하였다. 6개월간 상업운전을 통하여 기존 인버터 대비 소비전력량은 37.5%를 절감 하였고, 소음도 가속시 각각 12dBA 와 11dBA 가 감소함을 확인 하였다. 또한 70km/h에서는 3dBA가 감소 되었다. 경쟁사 대비 중량은 18%을 줄였다. 국산화된 추진제어 장치는 향후 발주되는 국내 및 해외 전동차량에 적용될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 정만규, 서광덕, "관성부하를 이용한 전동차 추진용 VVVF 인버터의 모의 주행 및 과도 상태시험", 전력전자 학회논문지, 제 4권, 제6호, pp.491-499,1999.12.
- [2] 정만규,고영철,방이석,서광덕, "전동차용 IGBT형 추진제어 장치의 본선시험에 관한 연구", 전력전자 학회논문지,제 5 권, 제 5호, pp.515-521,2000.10.
- [3] 김상훈(2014) 모터제어(DA,AC), pp.298-303.