

도시철도 표준전동차용 견인전동기의 국산화 설계 및 제작

왕종배*, 이수길*, 박현준*, 하현성**, 허익구**, 이인우**, 박삼순***

* 한국철도기술연구원 열차추진제어연구팀, ** (주) 효성 중공업연구소, *** 기술교육대

Standardization Design & Manufacturing of Traction Motor for Urban Transit EMU

J.B. Wang*, S.G. Lee*, H.J. Park*, H.S. Ha**, I.G. Hur**, I.W. Lee**, C.S. Park***

* Korea Railroad Research Institute, ** Hyosung Co., *** Korea Univ. of Tecnology & Education

Abstract- In this paper, the design characteristics, the manufacturing process and the results of performance test on the AC traction motor for urban transit standard E.M.U which is newly developed with applying standardization specification will be introduced. It is reviewed that the design and performance analysis on conventional motors considering system correlation and design constraint and the design optimization through an analysis of electro-magnetic, thermal and dynamic properties. The properties of factory products manufactured by 200 Class VPI process exhibit a excellent performance with a lower noise and vibration, higher efficiency and power factor etc.

- 3) 고정자와 회전자는 고조파 전류에 의한 온도상승과 손실을 최소화할 수 있는 구조로 한다.
- 4) 베어링의 윤활 방식은 주유관부 밀봉형 그리스 윤활 방식으로 하며, 누설전류 등에 의한 전식을 방지할 수 있는 구조로 한다.
- 5) 전동기의 기계적 강도를 위한 최고허용회전속도는 차량의 최고속도에 해당하는 회전속도의 120% 이상으로 한다.

1. 서 론

최근 도시철도 전동차에서 주행에 필요한 요구 견인력을 발휘하고 제어하는 추진제어장치는 속도제어가 용이하고 고효율 운전이 가능하며, 빈번한 기동과 정지에 따른 과부하와 전원의 급변에도 잘 견딜 수 있는 전기적 특성을 구비해야 한다. 특히 추진제어장치에 사용되는 견인전동기는 에너지 절약, 보수유지 절감, 기기의 소형·경량화 및 양호한 점착성능 확보를 위해 IGBT와 같은 대용량 고속 스위칭 소자를 적용한 VVVF 인버터 가변속 구동이 널리 확산되면서 3상 능형 유도전동기가 산업계 표준으로 자리잡아 가는 추세이다.

그러나 최신의 제어 방식과 복잡한 기능을 가진 추진 시스템에 대한 국내 기반기술이 취약하여 선진 외국제품의 직수입이나 기술도입에 전적으로 의존해온 상황에서 VVVF 인버터 구동에 따른 각종 추가 스트레스 요인의 분석과 이들이 관련 설비의 성능 및 수명에 미치는 영향을 제대로 파악하지 못하고 있는 실정이다.

따라서 도시철도차량의 운전 신뢰성과 안전운행을 확보하고자 중요 장치별 표준화 및 국산화 개발을 위해 한 국철도기술연구원을 중심으로 산·학·연 공동연구진을 구성하여 추진제어장치의 핵심을 이루는 견인전동기에 대한 독자적인 원천 설계 및 제작 연구를 수행하였다.

2. 표준 사양 및 설계 특성

2.1 표준 사양

도시철도 표준 사양에서 견인용 추진전동기는 정류자와 브러쉬가 없어 유지, 보수 및 취급이 용이하고 구조가 견고한 3상 능형 유도전동기를 채택하고 있으며, 인버터 구동에 의한 고조파 손실에 대응하기 위하여 내열성을 강조한 절연시스템을 적용하고 있다. 도시철도차량용 견인전동기의 표준 사양은 표 1과 같으며, 요구조건은 다음과 같다.

- 1) 견인 전동기는 3상 능형 유도전동기로서 빈번한 기동, 정지, 전동차의 진동 및 터널내 먼지등 악조건하에서도 견딜 수 있도록 한다.
- 2) 냉각 방식은 자기통풍 방식으로 하며, 공기 흡입구에는 필터를 사용하고, 통풍에 의한 소음발생을 최소화할 수 있는 구조로 한다.

표 1. 도시철도차량용 견인전동기 표준 사양

| | |
|--------|-------------------------------|
| 정 격 | ① 입력전압 : 3 ϕ , 1,100V AC |
| | ② 출 력 : 200kW |
| 사 양 | ③ 회전속도 : 1950rpm이상 |
| | ④ 최대토크 : 2100Nm이상 |
| 효 율 | 92% 이상 |
| 최고운전속도 | 4,950rpm이상 |
| 절연등급 | H중 이상 |

2.2 설계 분석

(1) 주행시뮬레이션에 의한 용량산정 및 설계특성 분석
현재 국내에 운영중인 VVVF 제어 견인전동기를 장착한 차량 및 노선 데이터를 수집하고 주행시뮬레이션 프로그램을 이용하여 시스템 연계특성을 고려한 차량 및 차량조건, 견인력-속도특성 그리고 견인전동기 소요용량을 검토하였으며, 이를 표 2에 요약 제시한다.

또한 기존 견인전동기의 설계특성 분석을 통해 구조방식, 사용재료 특성, 허용 전류밀도와 냉각방식, 고조파를 고려한 슬롯조합 등 표준형 견인전동기의 기본설계 사양산정을 위한 체계적인 기초자료 분석을 실시하였다.

표 2. 국내 VVVF 제어 견인전동기의 주행성능 분석

| 노선 | 상행 | | 하행 | | 목표 속도 (km/h) | P _{TM} (kW) |
|--------|-------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|--------------|----------------------|
| | V _{veh} [km/h] | I _{rms} [A] | V _{veh} [km/h] | I _{rms} [A] | | |
| 서울과천선 | 37.6 | 95.5 | 37.6 | 94.0 | 36.3 | 177 |
| 서울 5호선 | 34.9 | 106.0 | 35.0 | 105.6 | 36.1 | 196 |
| 서울 6호선 | 32.3 | 115.1 | 32.2 | 113.6 | 31.8 | 213 |
| 서울 7호선 | 36.7 | 104.7 | 36.6 | 104.6 | 36.1 | 194 |
| 서울 8호선 | 36.1 | 107.6 | 36.0 | 105.9 | 36.1 | 199 |
| 대구 1호선 | 31.8 | 102.5 | 31.7 | 101.2 | 31.8 | 190 |
| 인천 1호선 | 35.1 | 99.0 | 35.1 | 99.2 | 35.0 | 184 |
| 부산 2호선 | 33.5 | 95.7 | 33.9 | 96.3 | 33.9 | 178 |
| 광주 1호선 | 34.2 | 96.6 | 34.0 | 99.0 | 33.8 | 183 |

- (2) 인버터 스트레스를 고려한 200 Class 진공합침 절연시스템 적용
 - 고정자 권선구조는 고조파에 의한 표피효과를 줄이기 위해 권선의 턴수를 늘리고 내부 2 병렬 Y-결선된 2층 배열 '다이아몬드'형 코일 구조로 하였다.
 - 권선절연은 인버터 스트레스에 의한 써지전압과 부분

방전의 영향을 고려하여 충분한 대기간 절연여유를 두고 설계하였으며, 절연물의 증가 방식과 온도상승에 대한 배려로서 200 Class 실리콘 베이스 시스템으로 하여 열안정성을 높이고 신뢰성을 확보토록 하였다.

■ 고정자 프레임과 권선 구조물을 함께 진공함침(VPI) 처리하여 진동 및 오염조건에서도 높은 절연강도와 열응력을 가지도록 하였다.

3. 해석연구 및 설계 최적화

3.1 전자계 해석

견인전동기 유한요소 전자계 정상특성 해석에서 중요 부 자속밀도 검토 및 속도-토크 특성 분석을 실행하였다. 설계 최적화를 위해 슬롯조합과 형상, 누설구 높이, 2차 도체 형상 및 통풍홀의 영향 등을 검토하였으며, 인버터 6-step 스위칭 구동 외부회로를 이용한 전자계 해석을 통해 과도토크의 발생과 공극 자속성분의 고조파 해석을 수행하여 정현파와 인버터 구동시 발생하는 고조파의 특징을 비교, 분석하였다.

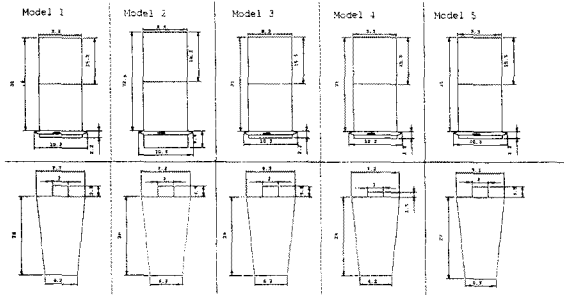


그림 1. 회전자 동 bar의 해석 모델

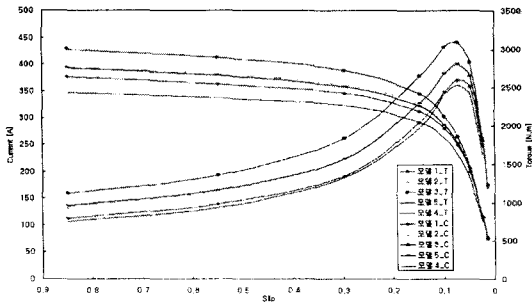


그림 2. 동 bar의 변화에 따른 토크-전류 특성비교

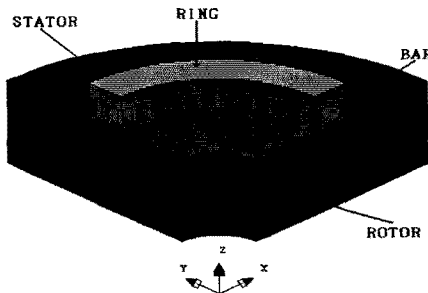


그림 3. 3차원 전자계 해석 model

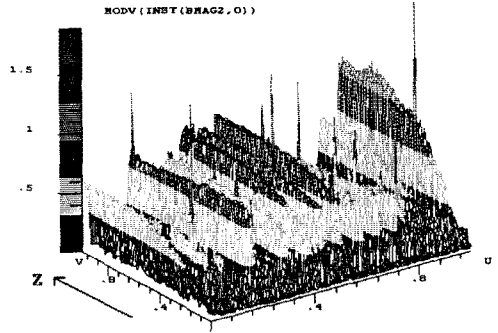


그림 4. 3차원 공극자속밀도 분포

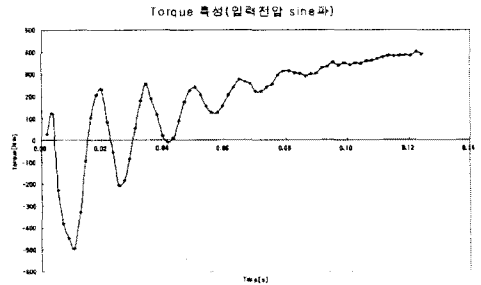


그림 5. 견인전동기 과도 토크 특성

3.2 열분포 해석

정격전류에 의한 견인전동기 온도분포 해석은 대칭성을 고려하여 고정자는 1/12, 회전자는 1/13 부분의 축소 모델로 해석하였다. 열계의 해석조건은 고정자의 경우 전류 125[A], 저항 0.06747Ω이므로 $P=I^2R$ 에서 입력전력은 1054[W]이고, 회전자는 동bar 1개당 전류밀도가 7.562[A/mm²], 저항 $0.292 \times 10^{-4}[\Omega/mm]$ 값에 의해 입력전력은 58.9[W]로 입력하였다. 외부 주위온도는 40[°C]이며, 회전자와 고정자를 따로 해석하였다.

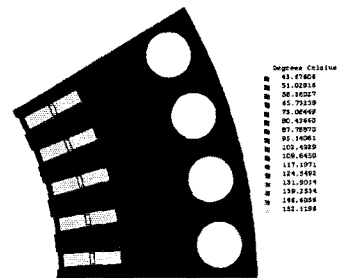


그림 6. 고정자(통풍구 22mmφ) T color shade

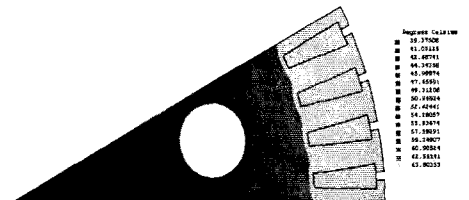


그림 7. 회전자(통풍구 28mmφ) T color shade

4. 표준형 건인전동기 제작

| 1) 회전자 | | 2) 고정자 | |
|--------------|-------------------------|---------|-----------------------------------|
| ■ 형 식 | 동판 농형 적층 철심 | ■ 권선 형식 | 3상, Y-결선 중원(Lap Wound) |
| ■ 철심직경 | 312 mm | ■ 철심 직경 | 510 mm(외경) 315 mm(내경) |
| ■ 슬롯 수 | 52 | ■ 슬롯 수 | 60 |
| ■ 통풍홀 | 25φ 12개 | ■ 통풍홀 | 22φ 48개 |
| ■ 전사프리트 겉 | 735.2±0.3 mm | ■ 상순/회전 | U-V-W / Clockwise Drive-End |
| ■ 철심길이 | 220 mm | ■ 병렬회로 | 2 |
| 3) 베어링 | | | |
| ■ D.E. 형식 | 원통형 롤러 베어링, 세라믹 절연 | | |
| ■ O.D.E형식 | 일렬, 딥 그루브 볼 베어링, 세라믹 절연 | | |

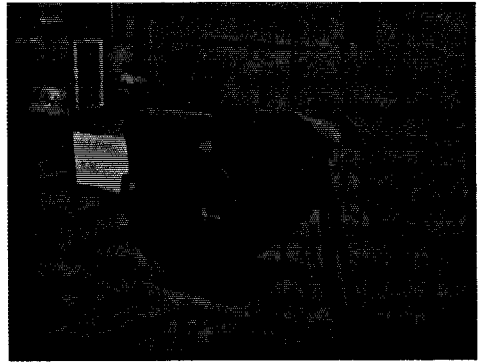


그림 8. 부하특성시험

5. 성능시험 및 특성 평가

국산화 설계, 제작된 표준전동차용 AC 건인 전동기는 도시철도 성능시험 기준에 의거하여 형식시험과 전수시험을 실시하였다. 형식 시험은 건인전동기의 정격, 특성 및 성능을 입증하기 위한 시험으로서 처음 1대에 한하여 적용하고, 전수 시험은 정확한 조립여부와 성능 재현을 검증하기 위한 시험으로서 모든 전동기에 대해 실시하며 처음 4대(형식시험용 1대 포함)의 산술평균치를 전수시험의 표준치로 적용한다.

표3. 인버터구동 부하특성

| 기준출력(%) | 150 | 125 | 100 | 75 | 50 | 25 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 신간전압 (Vrms) | 1269 | 1274 | 1281 | 1286 | 1289 | 1294 |
| 기부과 신간 전압(Vrms) | 1214 | 1219 | 1226 | 1231 | 1233 | 1239 |
| 전전류(Arms) | 174.9 | 146.9 | 121.1 | 97.7 | 77.8 | 63.8 |
| 입력(kW) | 328.3 | 272.9 | 218.8 | 164.8 | 112.1 | 60.8 |
| 회전수(RPM) | 1958 | 1964 | 1971 | 1977 | 1983 | 1989 |
| 토크(kg·m) | 150 | 125 | 100 | 75 | 50 | 25 |
| 출 력(kW) | 301.5 | 252.1 | 202.4 | 152.2 | 101.8 | 51.1 |
| 효 율(%) | 91.8 | 92.4 | 92.5 | 92.4 | 90.8 | 84.0 |
| 역 륜(%) | 91.0 | 90.6 | 89.1 | 85.5 | 77.0 | 55.0 |
| 슬 럽(%) | 1.855 | 1.554 | 1.203 | 0.902 | 0.602 | 0.301 |

표 4. 시험 결과 요약 (①호기 형식시험 실시)

| 항 목 | 기준치 | 측정치 | | | | 평균치 |
|------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | | ① | ② | ③ | ④ | |
| 냉저항 | 설계기준 0.165Ω±10% | 0.171 | 0.170 | 0.169 | 0.168 | 0.170Ω |
| 무부하 전 류 | 설계기준 31.5A±10% | 31.2 | 31.3 | 31.0 | 31.1 | 31.15A |
| 효 율 | 사양기준 92%이상 | 94.50 | 94.59 | 94.82 | 94.71 | 94.66% |
| 역 륜 | 사양기준 88%이상 | 91.30 | 91.28 | 91.28 | 91.35 | 91.30% |
| 진 동 | 3.5mm/s (~3500rpm) | 0.88* | 3.3 | 1.9 | 3.3 | |
| | 5.25mm/s (3501~4800) | 2.54* | 4.5 | 4.9 | 4.8 | |
| 내전압 | 4500V 1분 | 합격 | 합격 | 합격 | 합격 | |
| 절연저항 | 20MΩ이상 | >2000 | >2000 | >2000 | >2000 | |
| 종합 판정 | | 합격 | 합격 | 합격 | 합격 | |

* 진동시험 결과에서 ① 호기는 Flexible Bed 시험치 그 외는 Rigid Bed 시험치임.

6. 결 론

본 논문에서는 국내 최초로 도시철도 표준사양을 적용하여 자체 설계, 제작에 의해 국산화 개발된 표준전동차용 AC 건인전동기의 설계특성과 성능특성을 소개하였다. 개발품의 특징은 우선 정류자와 브러시가 없어 유지 보수 및 취급이 용이하고 구조가 견고한 3상 농형 유도전동기로서 VVVF 인버터 전력변환장치와의 연계성 확보를 고려하여 인버터 구동에 의한 고조파 손실과 스트레스에 대응할 수 있는 내열성을 강조한 200 Class 절연시스템을 적용하였다. 그리고 부품간 Interface를 중점적으로 고려한 독자설계과정에서 전자계 해석에 의한 최적설계 파라메타의 적용, 열분포 해석 평가, 구조체 및 회전자 응력 해석 등의 연구를 수행하였다. 최종 개발된 시제품은 높은 역률(91%), 효율(94%)의 우수한 성능향상과 저소음, 저진동 특성을 가지면서 도시철도차량 성능시험기준을 만족하고 있음을 시험, 평가를 통해 확인할 수 있었다.

[참고문헌]

- (1) PAUL L. COCHRAN: Polyphase Induction Motors.
- (2) Robert W. Smeaton: Motor application and maintenance handbook, Allis-Chalmers Manufacturing Company, 1969
- (3) Hans-peter Nee: On rotor slot design and harmonic phenomena of inverter-fed induction motors, Stockholm, 1996
- (4) Vlado Ostovic: Computer-aided Analysis of Electric machines, Prentice Hall, 1994
- (5) 竹内太郎, 磯部直吉: 新版電氣機器設計學, 1966
- (6) 金子伸: イソバーク驅動誘導電動機の二次導體形狀を考慮した廣速度範圍ちみ特性解析, RM-95-96, pp.39-48, 1996.
- (7) 日本電氣學會技術報告: イソバーク驅動誘導電動機の最適化, 第504號, 1994年 8月.
- (8) 電氣學會 電氣技報: 인버터 구동 유도전동기 특성 산정법에 관한 검토, II부, No.241 (1987)
- (9) 재우 Computer/ Magsoft: 96 전자장 해석 기술 세미나, 1996.
- (10) 富田 외: 전류형 인버터 구동 농형 유도전동기의 맥동토크 해석과 그 평가, 電學論, 97-B, 59 (1987-12).
- (11) 新良, 東覺: 유도전동기의 과도현상 및 이상현상의 직접적 simulation, 三夢電氣技報, 48, No.10, 1177 (1974).
- (12) JEC 37-1979: 일본전기학회 전기규격조사위원회표준규격
- (13) IEC 349: Rules for Rotating Electrical Machines for Rail and road Vehicles.
- (14) IEEE Std.112.1991: IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors.
- (15) 한국철도기술연구원, '98 도시철도차량 표준화, 국산화 연구: 추진제어장치연구개발(전동차 AC건인전동기 표준설계) 결과보고서.
- (16) 건교부, 도시철도 표준화, 국산화 연구: 성능시험기준(안).