

철도차량용 견인전동기의 절연설계 및 절연시스템 구성

Design & system construction of insulation on the traction motor for EMU

왕중배*, 홍선호, 조연옥, 김명룡
(J. B. Wang, S. H. Hong, Y. O. Cho, M. Y. Kim)

Abstract

Traction motors driven by high speed switching inverters is demanded higher operating temperature, severe duty cycles, higher starting current, frequent voltage transients and finally severe environmental exposure. For applications to inverter duty, traction motors needs a special insulation system, which has characteristics of increased bond strength, lower operating temperature and higher turn-to-turn insulation. In this paper, design considerations and manufacturing procedure of 200 Class insulation system with polyimide(Kapton) main insulation and silicone resin VPI process on the traction motor for EMU will be reviewed. And performance test and long life evaluation test which prove stability and reliability of insulation system for traction motor will be introduced.

Key Words : Insulation Design, Traction Motor, Performance Test 200 Class insulation System, Long Life Evaluation

1. 서 론

현재 철도차량용 견인전동기는 정류자와 브러쉬가 없어 유지보수 및 취급이 용이하며 구조가 견고한 3상 농형 유도전동기가 그 표준으로 널리 적용되고 있으며, 정격출력 200kW급으로 정격전압 1,100V 및 정격전류 130A, IGBT형 인버터에 의한 VVVF(가변전압가변주파수)제어로 운전주파수 0~200kHz범위에서 운전되고 있다. 이에 따라 철도차량용 견인전동기는 소형·경량으로서 대출력을 요구하는 공간상의 제약과 인버터 구동에 따른 고조파 손실에 대응하는 내열성이 강조되고 있으며, 다량의 고속스위칭 써지의 발생과 운전전압의 증첩에 따른 커다란 과전압

스트레스의 견인전동기 고정자 권선 집중 및 코로나 발생에 대비한 충분한 절연내력을 확보하여야 하며, 또한 운행환경으로서 진동, 충격, 전자기 등에 대한 기계적 내력과 먼지, 철분, 기름 등에 대한 장기 내구성을 확보할 수 있는 절연시스템 구성이 반듯이 필요하다.

이하에 철도차량용 견인전동기의 절연설계 고려사항으로서 표준사양의 요구조건을 제시하고, 이에 대응할 수 있는 특별한 절연설계 고려사항과 제작공정을 검토하며, 끝으로 운행 안전성과 장기신뢰성을 보장하는 엄격한 성능시험 및 장기수명평가시험에 대한 내용을 소개하고자 한다.

2. 철도차량용 견인전동기의 절연설계 고려사항

2.1 표준전동차용 견인전동기의 요구조건

철도전동차용 견인전동기는 다음의 요구조건을 만족하여야 하며, 표준사양은 표 1과 같다.

* 한국철도기술연구원 철도안전성능시험인증센터
(경기도 의왕시 월암동 374-1 한국철도기술연구원
Fax: 031-461-7651
E-mail: jbwang@krti.re.kr)

1) 전인전동기는 3상 농형 유도전동기로서 빈번한 기동, 정지, 전동차의 진동 및 터널내 먼지 등의 악조건에서도 견딜 수 있도록 한다.

2) 냉각방식은 자기통풍방식으로 하며, 공기흡입구에는 필터를 사용하고, 통풍에 의한 소음발생을 최소화 할 수 있는 구조로 한다.

3) 고정자와 회전자는 고조파 전류에 의한 온도상승과 손실을 최소화할 수 있는 구조로 한다.

4) 베어링 윤활방식은 주유관부 밀봉형 그리스 윤활방식으로 하며, 누설전류 등에 의한 전식을 방지할 수 있는 구조로 한다.

5) 전동기의 기계적 강도를 위한 최고허용회전속도는 차량의 최고속도에 해당하는 회전속도의 120%로 한다.

⑦ 슬롯내 전자기력 : 고정자 철심 슬롯내부 각 코일은 운전중 교류가 흐르고 이때 전자기력을 받게된다. 따라서 정상동작의 전자기력에 견디는 절연시스템과 견고한 고정자 필요. 만일 슬롯내의 코일변이 움직인다면 기계적인 마모열화가 발생하므로 슬롯내 공간을 채우는 스페이서가 필요.

⑧ 고정자 권선의 복합절연 구성에 따른 열팽창차이를 흡수할 수 있으며, 발열과 냉각의 수많은 반복 사이클에 견딜 수 있는 절연시스템 필요.

⑨ 오염 : 주요 절연구성 물질은 유기질이므로 광범위한 화학적 오염이나 수분의 침투에 의한 도전율 증가, 절연저항 저하 및 파괴확률 증가 초래

⑩ 도전성 이물질 침입 : 절연물 외벽, 엔드턴 및 공극부 등에 쌓임, 이중 철과 같은 강자성 물질은 회전자계에 의한 영향을 받아 절연물을 공격하여 열화시킨다. 또는 탄소분진의 침투로 절연물 표면에 심각한 트래킹이나 연면방전이 발생할 수 있음.

표 1. 표준전동차용 전인전동기 표준사양

정 격 사 양	① 입력전압 : 3φ 1,100V AC
	② 출 력 : 200kW
	③ 회전속도 : 1950rpm이상
	④ 최대토크 : 2100N.m이상
효 율	92%이상
최고운전속도	4,950rpm 이상
절연등급	H중이상

2.2 인가 스트레스 및 절연열화요인

철도차량용 전인전동기 절연시스템의 수명을 결정하는 여러 가지 열화요인으로서 온도, 시간, 주파수, 전압, 절연두께, 기계적 스트레스 및 오염 등의 환경적 요인을 들 수 있으며, 이들 요인이 운행조건과 환경에 따라 전기적, 기계적, 열적 요인의 상호작용에 의한 복합 스트레스로 작용하게 된다.

① 온도상승 : 절연저항 감소, 유전손실 증가, 파괴강도 저하

② 주파수 증가 : 유전손실 증가, 파괴강도 저하

③ 인가전압 특성 : 전압파형의 영향(급준도dv/dt), 전압씨의 반복 누적 효과

④ 코로나 발생 : 절연물 내부 기공(체적 코로나), 표면발생 코로나

⑤ 재료두께 : 절연설계시 충분한 절연확보를 위한 절연여유 설정

⑥ 고정자 권선의 전자기 충격 : 빈번한 기동, 정지에 따른 과도한 전류로 발생하는 전자기력은 고정자 권선의 2층에 비례하며, 엔드턴 고정부는 기동, 제동시 상순이 바뀔 때 마다 심각한 충격을 받는다. 따라서 엔드턴 부의 견고한 진동방지 지지구조 필요.

2.3 온도상승한도

철도차량용 전인전동기 온도상승은 전손실과 냉각 능력으로 결정되며, 절연등급에 따라 허용한도가 정해져 있어 이에 적절한 절연재료의 선정이 중요한 요소가 된다. 현재 사용재료의 절감과 고온 고전압 하의 절연에 대응하기 위해 내열성을 강조한 200 Class급 절연시스템으로서 폴리이미드(Kapton) 소선 절연과 실리콘 수지를 주체로 한 절연시스템을 적용하고 있다.

2.4 권선구조

철도차량은 소형·경량의 대출력화 추구로 공간상의 제약을 받으며, 누설리액팅스나 동선저항의 감소에 의한 특성향상을 위해 고정자 권선의 END부 길이가 일반산업용에 비해 짧게 설계된다.

그리고 고정자 권선은 인버터 구동에 의한 출력전압이 다량의 고주파를 함유하여 고정자 권선표면으로 전류가 흐르는 표피효과가 나타나므로, 이를 경감하기 위해 직렬결선이 아닌 권선의 턴수를 늘리고 권선 가닥수를 세분화한 병렬 Y-결선을 채용한다.

2.5 절연구성

① 고속 스위칭 능력을 가진 전력용 반도체(인버터)에 의한 다량의 반복 써지에 의한 절연열화와 코로나 발생에 견딜 수 있는 구조이어야 한다.

② 인가되는 써지전압이 전동기 고정자 권선의 각 상간 코일간에 균등히 분담되어야 하나 전동기의 구

조상 첫번째 턴에 집중되는 전압을 기준으로 하여 절연여유를 충분히 확보하는 턴간절연, 상간절연 및 대지절연을 실시한다.

③ 주변환경(진동, 고온, 먼지, 철분, 기름 등)에 따른 절연물의 열화에 충분히 대처할 수 있는 재료의 선택 및 절연구성을 선정한다.

3. 철도차량용 견인전동기의 절연시스템 구성

철도차량용 견인전동기의 절연시스템은 절연확보를 위한 절연두께가 두꺼워지면 상대적으로 전기기계의 주요 구성자재인 Core와 동선의 증가를 초래하므로 이를 보상하면서 온도상승에 대한 배려를 위해, 고온 고전압에 대응하는 200class 절연시스템을 채택하여 기기의 안전성을 높이고 고도의 신뢰성을 확보하여 불시의 사고에 최대한 대처하고 있다.

3.1 소선절연

① 재질 : Adhesive Kapton Tape 0.05t + Teflon fluorocarbon resin 0.013t

② 작업방법 : 1/2 Overlap x 1회 (0.25mm)

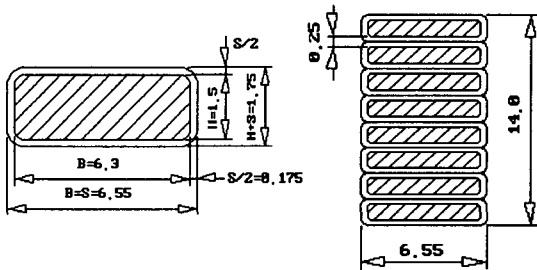


그림 1. 소선절연의 처리방법

내부 보이드의 잔류방지와 형권작업시 권선 굴곡부의 벽겨짐을 방지하기 위해 열처리를 하여 Kapton과 동선사이의 Teflon이 녹여 완벽한 밀착력을 확보하여야 한다.

3.2 주절연(대지절연)

① 1층 (대지절연) : Mica에 의한 내코로나성 보강과 기계적 강도 유지, Glass cloth는 실리콘과 적합성이 우수해야 한다.

- Silicone Resin 함침용 Glass Mica Tape 0.11t 적용
- 작업방법 : 1/2 Overlap x 2회 (0.88mm)

② 2층 (외장절연) : Nomex(polyamid지)는 충격흡수 및 마이카 박리를 방지하며, 실리콘 침투를 확보함.

- 재질 : Glass Nomex Tape 0.11t

- 작업방법 : 1/2 Overlap x 1회 (0.44mm)

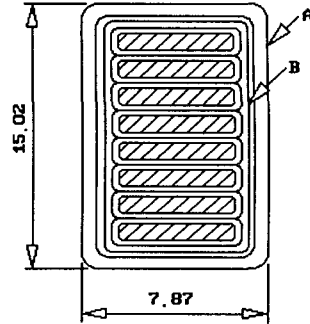


그림 2. 주절연(대지절연)의 처리방법

3.3 Slot절연

① Slot Liner : 철심에 삽입시 권선절연물 손상보호

- 재질 : Nomex Polyimide Film 0.13t

- 작업방법 : 8w x 230d x 3개소(0.39mm)

② Slot Cell : 층간절연 및 슬롯내 공간을 채워 권선의 진동방지

- 재질: Nomex(Aramid Paper) 0.13t

- 작업방법 : 88w x 230d x 1겹

③ Slot Wedge : 권선이탈 방지용 막이

- 재질: 비전동성 고온 Epoxy Glassfibre Laminate

- 작업방법 : 1.0t x 9.8w x 220d 삽입

④ Spacer : 소량의 바인더만을 포함하여 다공성과 흡수성을 가지는 Porous swellable rigid glass mat를 사용하면, 60℃

이상에서 함침수지와 접착하여 약 150%의 팽창을 가져와 빈 공간을 채운다. 이때 발생하는 압력은 약 0.1N/mm²이다.

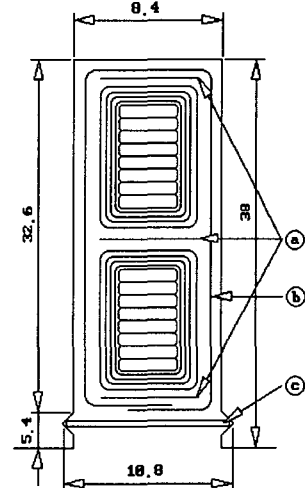


그림 3. Slot절연의 처리방법

3.4 진공가압합침용(VPI) 실리콘수지

주절연 합침 수지로서 저점도, solvent free, 단일 성분의 200class 합침용 Silicone resin (SI H62C)을 적용하며, 장기간의 사용수명과 경화후 우수한 열적, 전기적 특성을 가진 수지이다.

- 조성 : 변성methylphenylvinylhydrogenpolysiloxan
- 경화조건 : 200℃ 16시간 회전경화

표 2. 전인전동기 절연물의 전기물성

특성 재질	비유전율 ϵ'	파괴강도	체적저항 [Ω cm]
실리콘수지 (경화후 특성)	50Hz-10MHz 2.8-2.0	23℃: 90[kV/mm] 200℃: 75[kV/mm]	23℃에서 2×10^{17}
Kapton 필름	1kHz 3.6-3.7	25 μ m두께: 276[V/ μ m] 50 μ m두께: 213[V/ μ m] 75 μ m두께: 181[V/ μ m]	25 μ m두께: 1×10^{17} 50 μ m두께: 8×10^{16} 75 μ m두께: 5×10^{16}
Nomex 아라미드 paper	60Hz 2.5-2.7	23℃: 30[kV/mm]	5×10^{16}
슬롯 웬지	50Hz-1MHz 2.5	60[kV/mm]	

4. 성능시험 및 특성결과

철도차량용 AC 견인 전동기에 대한 검사 및 시험은 성능시험 기준에 따라 형식시험과 전수시험으로 구분하며, 성능시험 특성결과는 표 3과 같다.

표 3. 전인전동기 성능시험 특성

No.	시험 항목	기준	결과
1	연속온도 상승시험	권선온도 160K이하	118K
2	1시간온도 상승시험	권선온도 160K이하	122K
3	소음시험	4800rpm에서 115dB이하	105.8
4	진동시험	5.25 mm/s 이하	2.54
5	과속도 시험	5800rpm에서 2분간	O.K
6	부하특성시험	전류	125A이하 123.1A
		효율	92%이상 94.4%
		역률	88%이상 91.1%
		슬립	- 1.55%
8	무부하 시험	무부대전류	31.2A
8	구속 시험	구속전압	202.8
9	절연저항측정	20M Ω 이상	2000M Ω
10	내압시험	4500V 1분간	O.K

5. 절연신뢰성 평가

철도차량용 견인전동기의 절연시스템은 가혹한 운행조건과 인버터 구동 스트레스하에서도 20년 이상의 수명보장과 운전신뢰성 검증을 위해 10℃ 수명반감칙에 의거하여 표 3의 조건으로 그림 4와 같은 절차에 의한 가속열화시험을 수행한다.

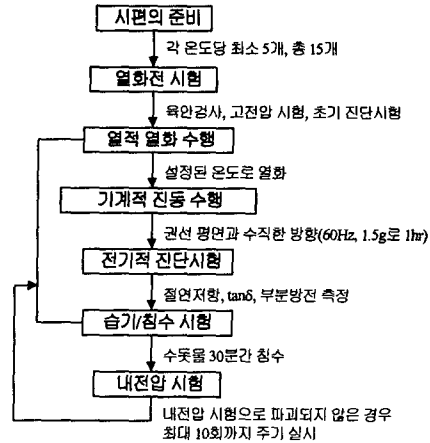


그림 4. 200 Class 절연시스템의 가속열화시험절차

표 4. 200 Class 절연시스템의 가속열화 조건

열화 온도	1주기열화기간	총열화기간 (10주기)
270℃	1.5일	15일
250℃	5일	50일
230℃	17.5일	175일

6. 결론

본 논문에서는 폴리이미드(Kapton) 소선절연과 실리콘 수지의 진공합침을 주제로 한 200 Class 절연시스템을 적용하는 철도차량용 견인전동기의 특별한 절연설계 고려사항과 제작공정을 살펴보고, 운행 안전성과 신뢰성을 보장하는 성능시험 및 장기신뢰성 평가시험에 대한 내용을 소개하였다.

참고 문헌

- [1] 한국철도기술연구원, "추진제어장치연구개발(전동차 AC견인전동기 표준설계)", '99 건설교통부 도시철도 차량 표준화,국산화 연구보고서, pp.78-180, 1999. 12.
- [2] 왕종배 외 6인, "도시철도 표준전동차용 견인전동기 국산화 설계 및 제작", 대한전기학회 '99 하계학술대회 논문집-전기철도(1), pp.424-426, 1999. 7.
- [3] 이준웅외 5인, "복합열화에 의한 형권 고정자 권선의 절연신뢰성에 관한 연구" 한국전기전자재료학회 2000년 하계학술대회 논문집-유기절연재료, pp. 152-155, 2000. 7.