

전동차 AC견인전동기의 가속열화에 관한 연구

박현준*, 김길동, 변운섭, 한영재, 장동욱, 왕종배
한국철도기술연구원 차량연구본부

A Study on the Accelerating Degradation for AC Traction Motor in Urban Transit EMU

Hyun-June Park, Gil-Dong Kim, Yoon-Sub Byun, Young-Jae Han, Dong-Uk Jang, Jong-Bae Wang
Korea Railroad Research Institute

Abstract - In this paper, the diagnosis method for AC traction motor is to reduce their maintenance loads. We tried to apply this method to maintenance of traction motor in railway vehicle. Sample coils for stator of traction motor were tested by accelerative thermal degradation which composed of heat, vibration, moisture, and overvoltage applying. Reliability and expected life were evaluated on the insulation system for 200 class traction motor.

1. 서 론

전동차용 견인 유도전동기는 고속화, 대용량화로 인한 설계전압의 상승, 빈번한 기동과 정지로 반복되는 냉열 사이클, 매우 가혹해진 열적, 기계적, 환경적 스트레스의 영향을 복합적으로 받고 있다. 특히 견인전동기 사고 중 절연파괴가 많은 비율을 점유하고 있는데 이는 부분방전을 포함한 절연열화와 관련된 사고발생기구가 지배적이며 여기에 진동과 환경적 요인이 복합된다.

최근 IGBT와 같은 대전력 고속 스위칭에 의한 인버터의 성능개선과 VVVF 제어에 의한 유도전동기의 효율적인 운전이 가능하게 되면서, 국내 도시철도차량에 사용되는 견인전동기 역시 VVVF 제어 PWM 인버터로 구동되는 200kW급 3상 능형 유도전동기를 표준사양으로 선정하여 열악한 운전환경(진동, 고온, 먼지, 절분, 기름 등)과 최소한의 정비상태에서 20년을 상회하는 운전 수명을 보장하도록 규정하고 있다. 따라서 200 Class 절연시스템으로 구성된 철도차량용 견인전동기의 수명평가를 하기 위한 기반연구로서, 가속열화에 대한 기준자료로서 활용하고자 한다.

2. 본 론

2.1 견인전동기 고장발생 원인 및 스트레스 분석

인버터로 구동되는 정격출력 200kW급 전동차용 견인전동기의 고장예측 및 운전 신뢰성을 평가하고자 C종(200℃) 절연구성의 실리콘 레진 합침된 견인전동기 고정자 형코일을 실제 생산조건과 동일하게 제작하였다.

고속 인버터 스위칭에 따른 급준 과전압 스트레스와 사용 환경을 고려한 고온가열 및 냉각에 의한 열 충격 스트레스, 기계적 진동인가 및 침수시험 등을 조합한 주기적인 복합 가속열화 시험법을 개발하였다.

그리고 복합가속열화에 따른 고정자 형코일 절연시스템의 상태진단시험으로서 절연저항, 유전손실 및 부분방전 특성을 조사하였고, 또한 20년 수명을 모의한 10주기의 복합 가속열화를 수행한 이후 이들 특성의 온도 및 전압 의존성을 분석하여 수명 중점에서의 견인전동기 고정자 형코일 절연시스템의 고장예측 및 신뢰성을 평가하고자 한다.

표 1. 전동차용 견인유도전동기 고장발생 원인 분석

고장발생	고장원인	고장분석
고정자 권선	<ul style="list-style-type: none"> 단자 과전압 높은 dV/dt 짧은 상승시간 반사파 공진 고조파 유입 온도상승 	<ul style="list-style-type: none"> 전동기 단자의 과전압 분석 고속 스위칭의 큰 dV/dt, 짧은 상승시간 권선 초임부전압 집중, 부분방전 유발 인버터-전동기 케이블 공진에 의한 반사파 과전압 증가 인버터 구동 온전특성 분석 고속 one pulse 운전: 저차 고조파, 동손증가 저속 PWM 운전: 고차고조파 deep bar effect 고조파 토크 발생, 진동 유발
베어링	<ul style="list-style-type: none"> 축전압 유기 부분방전 & 절연파괴 절지 전류 회귀 	<ul style="list-style-type: none"> 높은 dV/dt로 전동기 축전압 상승 과전류 유입으로 베어링 절연 파괴 절연피막 열연파괴, 베어링 손상 절지 전류 높은 dV/dt로 절지 도체부 회귀전류 발생

2.2 견인전동기 고정자 절연구성

현재 철도차량용 견인전동기의 절연시스템은 사용재료의 절감과 고온 고전압하의 절연에 대응하기 위해 폴리이미드(Kapton) 소선 절연과 실리콘 수지를 주재로 한 C종 즉 200 Class 절연의 적용이 확대되는 추세이다.

일반적인 전압 변경에 따른 차이점은 전동기 권선의 대지간 절연 여유이다. 이 절연 여유는 적용 재질 및 제조 방식에 따라 틀리지만 대개의 경우 10배 이상으로 설계한다. 따라서 써어지 전압과 코로나에 의한 영향을 고려하여 비록 전동기의 정격전압이 1100V 이라 할지라도 3300V급으로 설계되고 있다.

견인전동기의 절연시스템은 절연 확보를 위해 절연이 두꺼워 지면 상대적으로 전기기계의 주요 구성 자재인 Core 와 동선의 증가를 초래하는 문제를 보상하고 온도에 대한 배려를 위해, 고온 고전압에 대응하는 C종 절연시스템을 채택하여 기기의 안전성을 높이고 고도의 신뢰성을 확보하여 불시의 사고에 최대한 대처토록 하고 있다.

일반 산업용과 마찬가지로 견인전동기의 절연도 소선 절연, 주절연 그리고 Slot 절연으로 구성된다. 특히 견인전동기의 절연재질은 내열성을 강조한 200 Class급 절연시스템으로서 각 절연 구성별 재질 및 작업방법은 아래와 같고, 이에 적용된 절연절차 및 재료의 특성 다음과 같다.

① 소선 절연(Kapton) : 뛰어난 절연강도로 주절연 담당, 내코로나성 취약

- 재질 : Kapton Tape 0.05t + Teflon fluorocarbon resin 0.013t

- 작업방법 : 1/2 Overlap x 1회 (0.25mm)

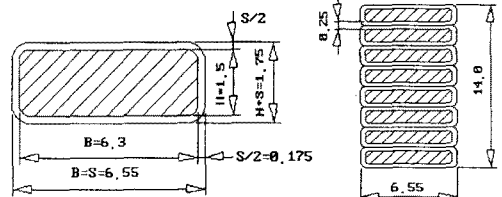


그림 1. 견인전동기 고정자 권선의 소선절연(Kapton)

② 주절연

- (1) 1층 (대지절연) : Mica에 의한 내코로나성 보강, 기계적 강도 유지, Glass cloth는 실리콘과 적합성 우수
 - 재질 : Silicone Resin 함침용 Glass Mica Tape 0.11t
 - 작업방법 : 1/2 Overlap x 2회 (0.88mm)
- (2) 2층(외장절연) : Nomex(polyamid지)는 충격흡수 및 마이카 박리 방지, 실리콘 침투 확보
 - 재질 : Glass Nomex Tape 0.11t
 - 작업방법 : 1/2 Overlap 1회 (0.44mm)

권선평폭 B = 6.55 + 1.32 = 7.87mm
 권선평높이 H = 14.0 + 1.32 = 15.32mm

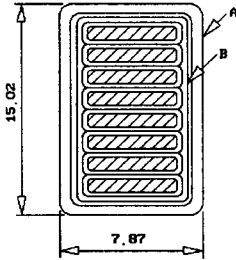


그림 2. 주절연 구성

③ Slot절연

- (1) Slot Liner : 철심에 삽입시 권선절연물 손상 보호
 - 재질 : Nomex Polyimide Film 0.13t
 - 작업방법 : 8w×230d×3개소(0.39mm)
- (2) Slot Cell : 층간절연 및 슬롯내 공간을 채워 권선의 진동방지
 - 재질 : Nomex(Aramid Paper) 0.13t
 - 작업방법 : 88w×230d×1겹
- (3) Slot Wedge : 권선이탈 방지용 막이
 - 재질 : Isoval 200(11)
 - 작업방법 : 1.0t x 9.8w x 220d
- (4) Slot 여유 : 이 공간에 실리콘 수지가 채워져 권선 절연을 보강하고 기계적 충격과 진동 흡수
 - (1) Slot폭 0.27mm
 - (2) Slot 깊이방향 1.18mm

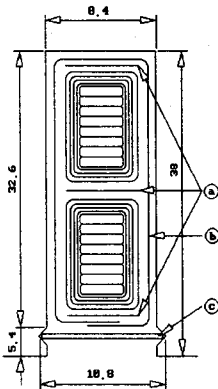


그림 3. Slot 절연 구성

2.3 관련시험 규격

표 2. 절연열화 수명평가 관련 규격 요약

규격	중요 내용	
IEC	34-18 Sect.3:	Test procedures for form-wound winding -Thermal evaluation and classification of insulation systems used in machines. 전동기 형권의 열적 열화 수명평가 시험으로서 절연등급에 따른 열열화 → 진동시험→습기/침수시험→전압시험→진단시험의 주기적 시험 진행.
	34-18 Sect.3:	Electrical evaluation and classification of insulation systems used in machines. 전동기 형권의 전기적 열화 수명평가 시험으로서 전압 레벨에 따라 전기적 열화 → 전압시험(주절연 / 권선간) → 진단시험의 주기적 시험진행. 절연파괴 자료의 Weibull 분포를 이용하여 전동기의 전기적 열화 수명을 평가
	34-15	Impulse voltage withstand levels of rotating a.c. machines with form-wound stator coils. 전동기 형권의 상-대지간 임펄스 전압 내력 평가를 위한 샘플 코일의 주절연과 턴간 절연에 인가되는 임펄스 전압시험 절차 및 전압 규정.
IEEE	275	Recommended practice for thermal evaluation of insulation systems for AC electric machinery employing form-wound preinsulated stator coils for machines rated 6,900 V and below. 전동기 형권 열 절연에 대한 정격 온도에서의 예상수명 판단. IEC 34-18-31과 유사.
	522	Guide for testing turn-to-turn insulation on form-wound stator coils for AC rotating machines. 전동기 형권의 턴간 절연에 대한 낙뢰 및 스워칭 써어지의 인가전압 파형 규정. IEC 34-15보다 구체적으로 임펄스 전압파형 정의.
	792	Trial-use recommended practice for the evaluation of the impulse voltage capability of insulation systems for AC electric machinery employing form-wound stator coils. 전동기 형권의 대지절연 및 턴간 절연에 대한 임펄스 시험 및 예상수명 판단. IEEE 275에 기술된 열 및 전기적 열화를 수행한 후 진동 및 임펄스 시험 실시하고, IEEE 522에 나타난 임펄스 파형을 이용, 절연파괴시험 실시.

2.4 시험설비 구성

가속 열열화 수행과 복합가속열화를 수행하면서 열화 주기별 절연상태진단을 위해 유전특성의 온도의존성 및 전압의존성, 부분방전 개시전압 및 소멸전압을 조사할 수 있는 그림 4와 그림 5의 진단시험설비를 구성하였다.



그림 4. 절연진단 시험설비 구성

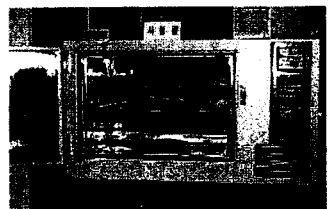
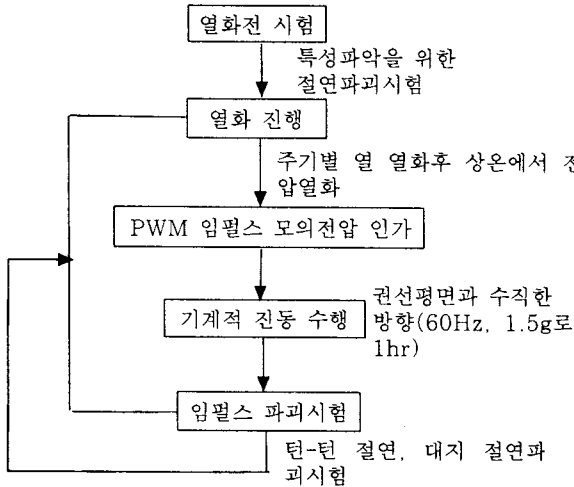


그림 5. 노이즈 차폐 측정용 오븐

2.5 가속열화 조건 및 진행절차

표 3. 200 Class 절연 가속 열 열화 온도와 기간

열화 온도	1주기 열화기간	총 열화기간 (10주기)
270°C	1.5일	15일
250°C	5일	50일
230°C	17.5일	175일



※ 각 그룹별 나머지 시료에 대하여 반복
그림 6. 복합가속열화 시험절차

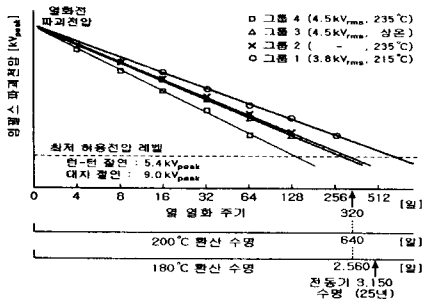


그림 7. 복합 열화시험에 의한 장기수명 평가 곡선

2.6 가속열화 수명 측정

표 3과 같이 선택한 열화 온도를 이용하고, 그림 6과 같은 시험 절차를 거쳐 열적 열화에 따른 시험의 예상 수명을 그림 8에 나타내었다.

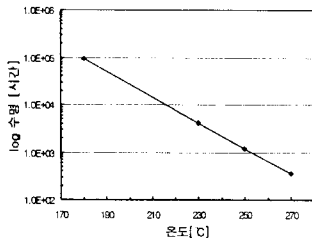


그림 8. 열적 열화시험에 따른 수명추정 결과

그림에서 알 수 있듯이 선택한 열화 온도에서 10주기를 충분히 견디었기 때문에 실제 전동기 운전시의 온도를 180°C라 할 때 추정된 수명은 선택한 열화 온도에서의 예상 수명점을 직선으로 그어 얻은 약 95,499시간

(3,979일)의 수명이 된다. 이것은 약 10.9년이지만 현재 고려되고 있는 견인전동기를 1일 10시간 운전으로 한달 25일을 운전한다고 하면 95,499시간의 수명은 31.8년에 해당되므로 이 기간의 수명은 보장된 것으로 볼 수 있다.

3. 결 론

VVVF 인버터로 구동되는 정격출력 200kW급 전동차용 견인전동기의 고장예측 및 운전 신뢰성을 평가하고자 C종(200class) 절연구성의 실리콘 래진 합침된 고정자 형코일을 실제 생산조건과 동일하게 제작하여 복합가속열화 상태진단에 의한 고장예측 및 신뢰성을 평가한 결과 아래와 같다.

- C종(200°C) 절연구성과 인버터 구동시의 열화특성을 고려하여 급준 과전압 썬지, 열 충격 스트레스, 기계적 진동인가 및 침수시험 등을 조합한 주기적인 복합가속열화 시험법을 개발하여 20년을 상회하는 수명보장 시험을 위해 10주기에 걸쳐 적용하였다.
- 복합가속열화에 따른 상태진단시험으로서 수명 종점에서의 절연저항, 유전손실 및 부분방전 특성에 대한 온도 및 전압 의존성을 분석한 결과,
 - 현재 유지보수에 적용하는 1분치 절연저항만으로는 절연시스템의 열화상태를 알 수 없으며, 주변 환경의 영향을 배제할 수 있는 성극지수(PI)의 평가와 더불어 분극전류의 성분분리에 의한 절연물 자체의 열화정도 평가가 이루어져야 한다.
 - 유전특성 및 부분방전 특성 분석에서 C종 절연시스템의 구조결합을 초래하는 한계온도는 250°C임을 알 수 있었으며, 이를 초과하는 경우 열화온도보다는 열화기간의 장시간 지속에 의한 영향이 절연물의 전체적인 구조결합을 더욱 증가시키는 것으로 여겨진다.

(참 고 문 헌)

- [1] Austine H. Bonnett, "Analysis of the Impact of PWM Inverter Voltage Waveforms on AC Induction Motors", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol.32, No.2, pp.386-392, 1996.
- [2] A. Jouanne, etc. "Filtering Techniques to Minimize the Effect of long Motors Leads on PWM Inverter-Fed AC Motor Drive System", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.32, No.4, pp.919-925, 1996.
- [3] Satoshi Ogasawara, "가변속 AC drive의 누설전류, 썬지전압, 축전압과 그 대책", 日本 電學論D, 118권 9호, pp.975-980, 평성 10년.
- [4] Paul T. Finlatson, "Output Filters for PWM Drives with Induction Motors", IEEE Ind. App. Mag., Jan./Feb. 1998.
- [5] Austien H. Bonnett, "Available Insulation Systems for PWM Inverter-Fed Motors", IEEE Ind. App. Mag., Jan./Feb. 1998.
- [6] Les Manz, "Motor Insulation System Quality for IGBT drives", IEEE Ind. App. Mag., Jan./Feb. 1997.
- [7] 일본규격협회, "전기전자 부품의 수명진단", 1991.
- [8] Gregory C. Stone & L. Edward Braswell, "Motor Insulation System", Motors Handbook, pp.427-456, Marcel Dekker, Inc., 1995.
- [9] 한국철도기술연구원 '99 도시철도차량 표준화, 국산화연구 : 추진제어장치연구개발(전동차 AC견인전동기 표준설계)