

가속 열열화 시험에 의한 고정자 형권 코일의 절연특성에 관한 연구

A Study on the Insulation Properties for Stator Form-wound Winding by Thermal Degradation Test

채승훈*, 김상걸*, 오현석*, 신철기*, 왕종배**, 김기준***, 이준웅****
(S.H. Chae*, S.K. Kim*, H.S. Oh*, C.G. Shin*, J.B. Wang**, K.J. Kim***, J.U. Lee****)

Abstract

In case of developing new motor, many examinations was tested to decide a motor efficiency and reliability. To give reliability judgment, traction motor winding insulation was tested by electrical method after applying electrical, heat, mechanical, environmental stress. In this study, stator form-wound winding of traction motor in urban transit E.M.U was tested by accelerative thermal degradation test. Stator form-wound winding was tested on the accelerative degradation composed of heat, vibration, moisture, overvoltage and researched insulation resistance, dielectric loss, partial discharge for insulation degradation properties, evaluated withstand voltage. Degradation temperature was 230[°C], 250[°C], 270 [°C] for stator form-wound winding respectively. On the test results of accelerative thermal degradation, insulation properties were relied all temperature until 10 times and expected life was evaluated by the rule of reducing 10[°C] life into halves. Expected life was 31.8 years. It is guaranteed insulation reliability because of exceeding 25 years life times as considering.

Key Words(중요용어) : Accelerative thermal degradation(가속 열열화), Insulation resistance(절연저항), Dielectric loss(유전손실), Degradation temperature(열화온도)

1. 서론

일반적으로 새로운 전동기를 설계/개발하는 경우에는 개발된 전동기의 성능이나 장기 신뢰성 판단을 위해 각종 시험이 수행된다. 장기 신뢰성 확보를 위해 현재까지 나와있는 기존 시험 규격들은 주로 전

동기의 운전수명에 가장 중요한 요소인 권선의 절연에 대해 각종 전기적, 열적, 기계적, 환경적 스트레스를 인가한 후 전기적 방법에 의해 시험하는 것이다.

본 연구에서는 개발된 한국표준형 전동차용 견인 전동기의 장기 신뢰성을 확보하기 위하여 기존의 시험 규격을 토대로 한 가속 열열화 시험 방법으로 견인전동기 고정자 코일의 열화 특성을 관찰하고, 이 결과로부터 고정자 코일의 수명을 예측하여 견인전동기의 장기신뢰성을 확보하고자 한다.

* : 광운대학교 전기공학과
(서울특별시 노원구 월계동 447-1,
E-mail : hun918@emlab2.kwangwoon.ac.kr)

** : 한국철도기술연구원
*** : 시립인천전문대학
**** : 전기전자재료학회장

2. 견인전동기의 절연구성과 특징

2.1 고정자 코일의 절연구성시 고려사항

전동기의 절연시스템은 전동기 구성이나 운전

있어서 가장 중요한 성분중 하나이며, 전동기의 만족스런 운전수명과 신뢰성은 그 기능을 수행하는 절연시스템의 능력정도에 크게 의존한다.

따라서 절연설계시 고려해야 할 요소로서

- ① 열적 요소 : C종 절연능력 및 열방사능력 (열전도성) 확보
 - ② 기계적 요소 : 진동, 충격, 전자력에 대한 내력 확보
 - ③ 전기적 요소 : 고속 스위칭, 급준 써지, 과도현상에 대한 내력 확보
 - ④ 환경적 요소 : 소음, 진동, 분진, 오염물, 화학제 등에 대한 내구성 확보
- 을 고려한 절연시스템을 구성하여야 한다.

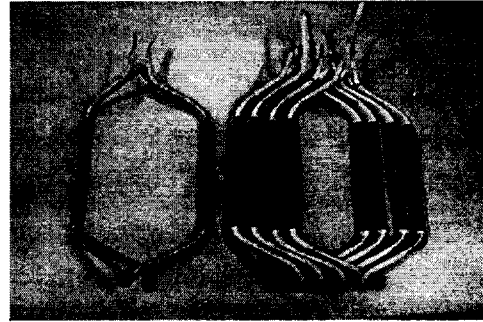


그림 1. 고정자 형권 코일 샘플

2.2 견인전동기 절연구성

현재 철도차량용 견인전동기의 절연시스템은 사용재료의 절감과 고온 고전압하의 절연에 대응하기 위해 폴리이미드(Kapton) 소선과 실리콘 수지를 주체로 한 C종 절연의 적용이 확대되는 추세이다.

일반적인 전압변경에 따른 차이점은 전동기 권선의 대지간 절연여유이다. 이 절연 여유는 적용재질 및 제조방식에 따라 틀리지만 대개의 경우 10배 이상으로 설계한다.

이에 적용된 각 절연 구성별 재질 및 절연절차 및 재료의 특성은 표1과 같다.

표 1. 고정자 코일 절연재료 특성

품 명	사양 및 규격
C종 절연자재	소선절연물 Kapton코팅처리
	대지절연물 Kapton Film
	대지절연물 Nomex-aramid paper
	주절연물 Silicone Resin
	슬롯왁지 Epoxy-glass tape 적층판
모의철심용 동판 두께 : 1.5 mm	
절연처리 및 형코일 샘플 제작	턴절연 시험용 소선별 인출선 절연보강 처리
	모의철심을 가진 샘플코일 제작
	동판슬롯구조의 모의 철심 및 형 코일 샘플제작
VPI 함침처리	Silicone Resin 진공함침
	함침 60℃-3hr 건조 200℃-16hr

3. 가속 열열화 시험

3.1 열화온도 및 기간 설정

C종 절연시스템을 가진 철도차량용 견인 전동기의 최고 허용온도는 200[℃]로서 IEC 34-18-31에 따르면 10[℃] 수명반감법칙에 근거하여 형코일에 대한 열적 열화 시험을 수행하게 된다. 이때 정격 최고온도보다 높은 최소 3가지 이상의 온도로 열화시켜야 하고 각 선택 온도의 차이는 20[℃] 이상이 되도록 규정하고 있다.

본 연구에서는 200[℃] 절연등급의 경우 열적 열화 메카니즘이 240[℃]를 경계로 달라지는 경우가 많으므로 선택된 열화온도와 열화기간은 표2와 같다.

표 2. 가속 열열화 온도와 기간

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

3.2 가속 열열화 시험방법

가속 열화시험 방법을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 시편의 준비 : 그림1과 같은 고정자 형권 샘플을 각 열화 온도당 최소5개, 총 최소 15개 소요
- (2) 열화전 시험
 - ①육안검사
 - ②고전압 시험 : 코일단자-대지 사이에 1분간 인가 ($2,200 V_{rms} + 1 kV = 3,200 V_{rms}$)
- (3) 열적 열화 수행 : 설정된 온도로 열화
- (4) 기계적 진동 수행 : 권선 평면과 수직인 방향으로 중력 가속도 1.5g로 1시간 수행

(5) 전기적 진단시험

- ① 절연저항 측정 : 10분간 DC 1000V 인가
- ② Tan δ 측정 : 500V~2500V 사이 유전손실 측정
- ③ 부분방전 측정 : 부분방전 개시전압 측정

(6) 습기/침수 시험

수돗물에 30분간 침수, 또는 48시간 분무 흡수

(5) 내전압 시험 : 10분간 상용주파수 2,200V_{rms} 인가

설정된 열화온도와 기간에 따라 열화를 시킨 후 전기적 진단시험을 수행하고 내전압 시험에서 절연 파괴되지 않은 경우에는 반복하여 최대 10회 주기까지 수행한다.

4. 시험 결과 및 분석

4.1 절연저항 특성

절연저항은 전압인가 시점부터 측정된 시간에서 직류인가 전압을 전류로 나눈 값이다. 그 기준은 1분값의 절연저항이다.

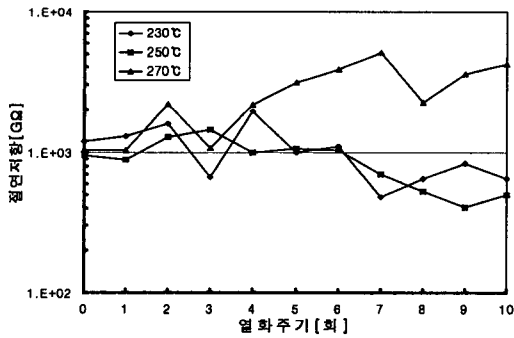


그림 2. 절연저항 1분값 비교

측정한 절연저항 값들은 초반에 증가하는 경향을 나타내는데 이는 샘플코일의 제작시 마이카와 실리콘 수지가 완전히 경화되지 않기 때문에 결합력이 떨어져 내부에 많은 미세 보이드 등이 존재하여 열 열화에 의해 실리콘 수지가 경화됨에 따라 절연재 내부의 미세 보이드 등이 감소한 것으로 판단된다. 270[°C]에서 측정된 절연저항 값이 제일 좋은 특성을 보이고 있는데 이는 열화온도보다 열화기간의 영향이 열화에 더 지배적임을 알수가 있다.

10주기가 지난 후에도 절연저항 값이 현저한 저하를 보이지 않고 있으므로 안정된 수명을 보장한다고 판단한다.

4.2 성극지수(PI) 특성

성극지수는 절연저항 10분치와 1분치의 비율로서 절연상태의 판단기준이 된다. 보통 성극지수가 2이상인 경우 정상으로 간주하고 2이하의 문제대상이 된다.

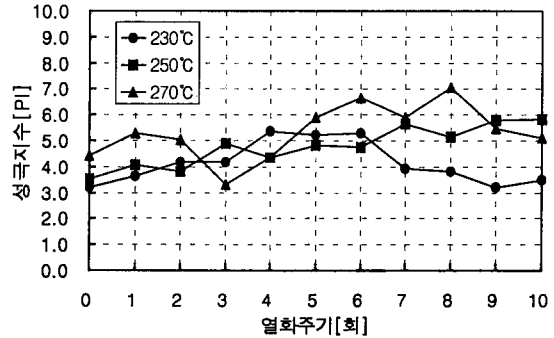


그림 3. 성극지수(PI) 특성 비교

10주기까지 성극지수가 2이상을 모두 넘고 있으므로 절연상태가 양호하고 안정된 수명을 보장한다고 판단된다.

4.3 유전손실(Tan δ) 특성

열화주기의 진전에 따라 대체로 유전손실이 증가하는 경향을 나타낸다. 열화초기에는 각각의 열화온도에서 유전손실의 값의 차이가 적으나 열화가 진행될수록 유전손실의 차이가 커지는 경향을 보이고 있다. 절연저항에서의 특징과 마찬가지로 270[°C]에서 가장 안정한 유전손실 특성을 보이고 있다.

10주기 열화가간동안 측정치의 최대값이 10[%]이고 방전개시전압이 2,000[V]이상을 만족함으로 유전손실 특성은 안정적으로 판단할 수 있다.

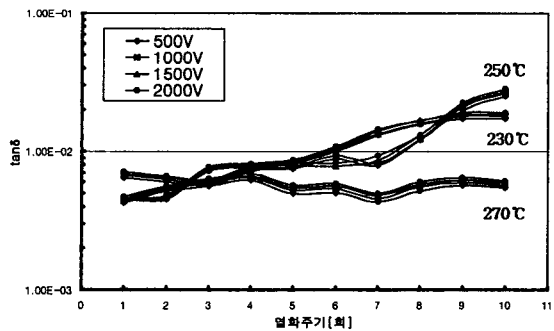


그림 4. 유전손실 특성 비교

4.4 부분방전 특성

그림5는 230[°C] 열화온도에서 열화 주기별 방전 개시전압(PIV)을 측정된 결과이다. 열화주기가 진행될수록 방전개시전압이 낮아지는 경향을 볼수가 있는데 이는 열화에 의한 마이카 테이프의 층간 접착저하, 층간 박리 그리고 절연재 내부의 보이드의 증가 등이 그 원인으로 판단된다.

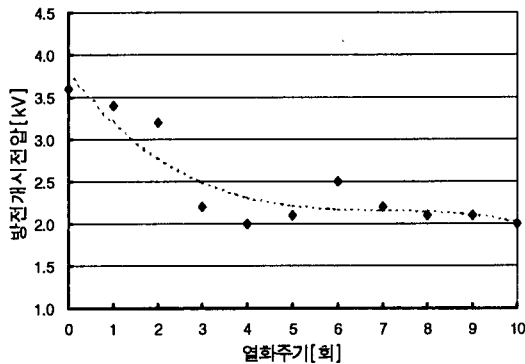


그림 5. 230[°C] 부분방전 개시전압

4.5 가속 열열화에 의한 수명예측

절연진단 시험 결과 선택한 열화온도 230, 250, 270[°C]에서 10주기를 충분히 견디었기 때문에 10 [°C] 수명 반감의 법칙에 의해 실제 전동기 운전시 온도 180[°C]에서의 예상 수명점은 95,499시간(3,979 일)으로 판단할 수 있다.

이것은 현재 고려되고 있는 견인 전동기를 1일 10시간 운전으로 한달 25일을 운전한다고 하면 수명은 31.8년에 해당되므로 이 기간 이상의 수명은 보장된다고 판단한다.

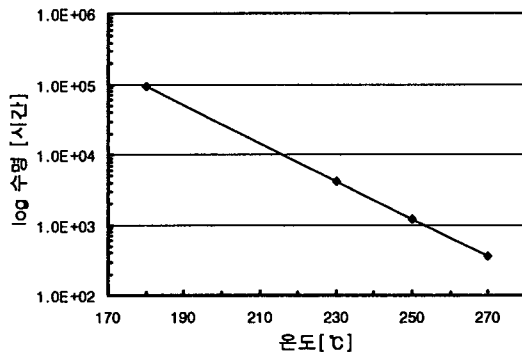


그림 6. 가속 열열화 시험에 따른 수명예측

5. 결론

본 연구에서는 최근 전기 철도 차량용으로 사용되는 견인전동기의 고정자 형권 샘플 코일에 대해 가속 열열화 시험을 수행하여 견인전동기 절연시스템의 절연신뢰성 및 장기수명예측을 평가하였다.

모든 전기적 진단 시험에서 안정적인 절연신뢰성과 수명예측에 의해 고정자 형권 코일의 장기 신뢰성을 판단할 수가 있었다. 여기서 얻은 절연진단 및 평가결과는 향후 견인전동기의 효과적인 고장진단 및 예방보존에 기여 할 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] 한국철도기술연구원, "추진제어장치 연구개발 결과보고서", (분야 : 전동차 AC 견인전동기 표준설계) 건설교통부, 1998
- [2] "Functional Evaluation of Insulation Systems for Rotating Electrical Machines", IEC Document 34-18-1, 1998
- [3] "Test Procedures for Form-wound Windings - Thermal Evaluation and Classification of Insulation Systems used in Machines up to and Including 50MVA and 15kV", IEC Document 34-18-31, 1998
- [4] Hiroshi HATA, Takahi MAEDA, "Improvement of Insulation Tests for Traction Motor", QR of RTRI, Vol.38, No.1, 1997
- [5] 모일순, 김희동, 이영준, 주영호, "고압전동기 고정자 권선 절연재료에서 유전정접 특성", 대한전기학회, pp.2101-2103, 1999
- [6] 이정일, 이종인, 김기찬, 이갑재, 김진호, 최영찬, 박정태, "전동차 견인용 유도전동기 절연설계", 대한 전기학회, pp.333-336, 1999
- [7] G. Harold Miller, "Trends in Insulation Materials and Processes for Rotating Machines", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 14, No.5, pp.7-11, 1998.
- [8] G.C. Stone, "The Use of Partial Discharge Measurements to Assess the Condition of Rotating Machine Insulation", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.12, No.4, pp.24-27, 1996.