

철도차량용 견인전동기의 형권 고정자 코일에 대한 절연열화 특성 연구

김기준*, 채승훈**, 왕종배***, 박현준***, 이인우****, 허익구****, 하현성****
 *인천전문대학, **광운대학교, ***한국철도기술연구원, ****효성중공업연구소

A Study on the Insulation Degradation Properties for Stator Form-winding of Traction Motors in Urban Transit E.M.U

K.J. Kim, S.H. Chae, J.B. Wang, H.J. Park, I.W. Lee, I.G. Hur, H.S. Ha
 Junior college of Incheon, Kwangwoon University, Korea Railroad Research Institute, Hyosung Co.

Abstract - In this paper, sample coils for stator form-wound winding of traction motor were made for the accelerative thermal degradation composed of heat, vibration, moisture and overvoltage. In progress of test periods, diagnosis tests such as insulation resistance, dielectric loss and partial discharge were investigated. Reliability and expected life were evaluated on the insulation system for 200 class traction motor considering various environmental stress.

1. 서 론

도시철도차량 표준형 견인전동기는 인버터 구동방식이 적용되어 운전성능 면에서 인버터에 의한 고조파의 영향으로 전자기적 진동, 소음, 축 비틀림, 고조파 손실에 의한 축전압, 온도상승, 써지발생 및 유도장해와 같은 여러 가지 악조건인 상황에서 운전되어야 하는 어려움이 발생된다.

그러므로 전동기의 안전과 수명보증을 검증할 수 있는 인버터 구동을 고려한 절연설계 검증이 반드시 실시되어야 하며, 이를 위해 전동기 고정자 형권 샘플을 대상으로 한 가속열화시험 및 수명평가시험이 절연시스템의 성능검증과 신뢰성을 검증하기 위해 반드시 필요하다.

본 연구에서는 정격출력 200kW급의 도시철도차량 표준형 견인전동기가 IGBT 전력소자에 의한 VVVF 제어 될 때 정현파 전원의 구동과는 다른 열화 메커니즘을 분석하고 신뢰성 검증을 위해 실리콘 수지와 폴리이미드를 베이스로 한 200 class 진공함침 처리된 전동기의 고정자 형권 샘플코일에 대한 가속 열열화 수명평가 시험을 수행하였다.

2. 철도차량용 견인전동기의 절연구성과 특성

개발된 도시철도차량용 표준 AC 견인전동기의 사양은 정격출력 200kW, 정격인가전압 1,100V 및 정격전류 130A로서 PWM 방식에 의해 0~200kHz범위에서 VVVF 인버터로 가변속 제어 된다.

2.1 견인전동기 절연구성시 고려사항

철도차량용 견인 전동기의 절연시스템은 사용재료의 절감과 고온 고전압하의 스트레스에 대응하기 위해 폴리이미드(Kapton) 소선절연과 실리콘 수지를 주재료로 한 200 Class 절연의 적용이 확대되는 추세이다. 특히 인버터 구동시 고려해야 할 절연설계 요소로서

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

을 고려한 절연시스템을 구성하여야 하며, 인버터 구동 견인전동기의 절연시스템은 다음과 같은 조건을 만족하여야 한다.

- 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 균등 분담되어야 하나 전동기의 구조상 첫 번째 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.

2.2 견인전동기 절연구성과 권선샘플 제작

본 연구에서 견인전동기의 가속 열열화 시험을 위해 실제적인 설계 요소가 모두 포함된 고정자 형권코일 권선 샘플의 절연구성과 제작 공정은 다음과 같다.

(1) 절연설계 시스템의 구성 및 절연처리 공정

200 Class 절연을 보증하는 주절연(소선절연), 대지절연, 엔드턴 절연구성을 구성하여 silicone 수지의 VPI 함침처리를 통해 권선샘플을 제작하였으며 이에 적용된 절연절차 및 재료의 특성은 표 1과 같다.

표 1. 견인전동기용 200 Class 절연재료의 특성

품 명	사양 및 규격	
1. 200class 절연자재	소선절연물	Kapton코팅처리
	대지절연물	Kapton Film Nomex-aramid paper
	주절연물	Silicone resin
	슬롯렛지	Epoxy-glass tape 적층판
	모의철심용 동판	두께: 1.5 mm
2. 절연처리 및 형권코일 샘플 제작	턴절연 시험용 인출선 처리	소선별 인출선 절연보강 처리
	모의철심을 가진 샘플코일 제작	동판슬롯구조의 모의철심 및 형권코일 샘플제작
3. VPI 함침처리	Silicone Resin 진공함침	함침 60°C-3hr 건조 200°C-16hr

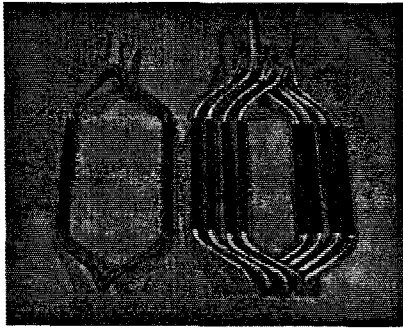


그림 1. 제작된 형코일 샘플

3. 가속 열 열화 시험

3.1 열화 온도 및 기간의 설정

200 Class 절연 시스템을 가진 철도차량용 건인전동기의 최고 허용온도는 200 °C로서 IEC 34-18-31에 따르면 10°C 수명반감칙에 근거하여 형코일 권선에 대한 열적 열화 시험을 수행하게 된다. 이때 정격 최고온도 보다 높은 최소 3 가지 이상의 온도로 열화시켜야 하고 각 선택 온도의 차이는 20 °C 이상이 되도록 규정하고 있다. 한편, 열화 온도를 높게 선택하면 시험은 빨리 진행시킬 수 있으나, 신뢰성에 대한 오차가 늘어나므로 적절한 온도를 선택하여 신뢰성과 시험시간에 대한 잇점을 살려야 한다.

본 연구에서 평가하려는 200°C 절연등급의 경우 열적 열화 메카니즘은 240°C를 경계로 달라지는 경우가 많으므로 240°C 이하의 열화 온도의 선택이 필요하다. 따라서, 230°C를 선택하면 그 상위의 온도레벨은 250 °C와 270 °C가 된다. 이렇게 선정된 열화 온도 및 열화 기간은 다음 표 2와 같다.

표 2. 200 Class 절연 가속 열 열화 온도와 기간

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

3.2 가속 열 열화 시험방법

표 2와 같이 선택된 열화 온도를 이용한 열 열화시험 방법을 요약하면 같다.

(1) 권선샘플 준비

그림 1과 같은 고정자 형권 샘플은 각 열화 온도레벨 당 최소 5 개로 총 최소 15 개 소요

(2) 열화 전 시험

- ① 육안 검사 : 시편의 상태 검사
- ② 고전압 시험 : 코일단자-대지 사이에 1 분간 인가 $2U_N(1,100V_{rms}) + 1kV = 3,200 V_{rms}$
- ③ 초기 진단시험(절연저항, $\tan \delta$, 부분방전 측정)

(3) 열화 수행

① 열 열화 인가

히트싸이클 중격을 주기 위해 표 2에 설정된 열화 온도로 예열된 오븐에 시편을 넣고, 꺼낼 경우도 그 온도에서 상온으로 그대로 꺼냄.

② 기계적 진동시험 수행

열 열화 주기마다 진동 테이블 위에 고정자 권선 시편을 설치하고 다음 조건으로 진동 시험 수행

- 진동방향 : 권선 평면과 수직한 방향
- 진동 조건 : 60 Hz, 0.2 또는 0.3 mm (1.5g)로 1 시간 (단, 전압인가 없음)

③ 진단시험

- 1) 절연저항 측정: DC 1000V 인가, 1분과 10분치 절연저항에 의한 성극지수(PI) 측정
- 2) $\tan \delta$ 특성: 500V~2500V사이 유전손실 측정
- 3) 부분방전 측정: 부분방전 개시 및 소멸전압 측정
- ④ 습기시험/침수시험
 - 수돗물 30 분간 침수, 또는 48시간 분무 흡습
- ⑤ 내전압 인가
 - 습기시험후 젖은 상태에서 내전압 인가
 - 인가전압: 상용주파수 2,200V_{rms}, 10분

(4) 시험 주기

내전압 시험에서 절연 파괴되지 않은 경우에는 (3)의 ① ~ ④ 항을 반복하여 절연파괴될 때까지 주기적인 열적 열화시험을 수행함. 최대 10 회 정도까지 주기를 실시하는 것으로 되어 있다

200 Class 절연의 가속열화에서 270°C-1.5일의 10 주기를 절연이 파괴되지 않고 특성의 현저한 저하없이 견딘다면 이는 10 °C 수명반감 법칙에 의해 열 열화 수명을 산정하여 수명 보장 여부를 판정할 수 있다.

3.3 장기 수명 예측 및 신뢰성 평가

절연파괴 데이터로부터 그림 2의 수명에측으로 열적 열화에 따른 시편의 적정 수명을 도출한다.

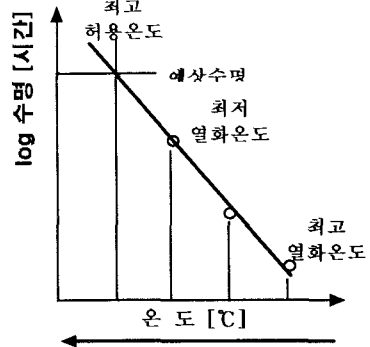


그림 2. 수명의 예측 방법

4. 시험 결과 및 검토

본 연구의 200Class 절연구성 샘플의 경우 270°C -1.5일의 10 주기 열화가 끝난 후에도 절연파괴는 일어나지 않았으며, 진단시험 결과에서 절연저항이나 유전손실 특성의 현저한 저하가 없이 부분방전 개시전압 또한 10주기 열화 이후에도 2kV이상으로서 열열화 따른 안정된 특성과 수명을 보장하는 것으로 여겨진다.

4.1 절연저항 특성

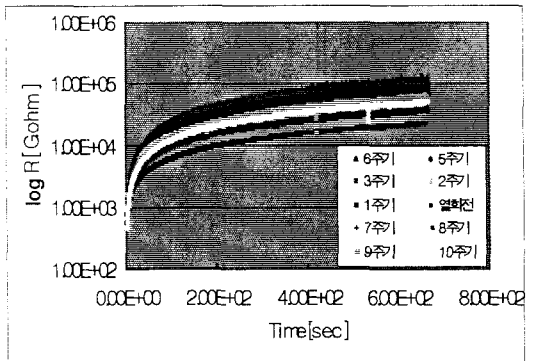


그림 3. 열화 주기별 절연저항의 변화

그림 3은 270℃-1.5일 열 열화를 10주기 동안 진행하며 측정된 절연저항의 주기별 결과를 나타낸 것으로 열화주기가 거듭될 수록 절연저항은 점차적으로 감소하는 경향을 보이지만 큰 변화를 나타내지는 않았다.

4.2 유전손실(tan δ) 특성

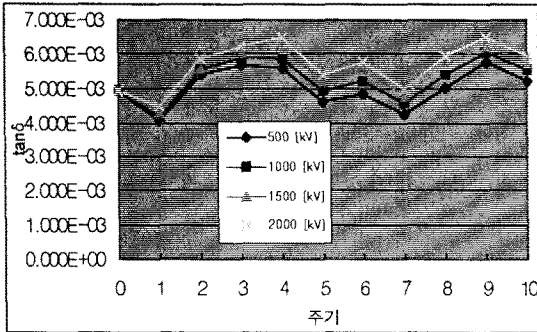
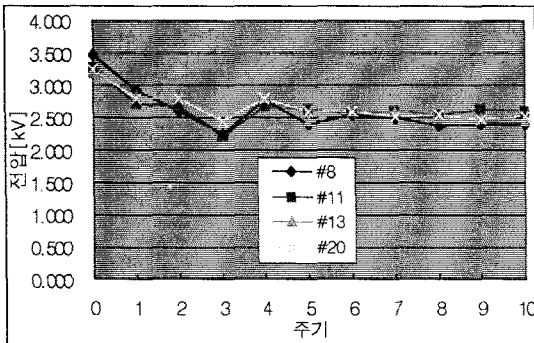


그림 4. 열화 주기별 유전특성의 변화

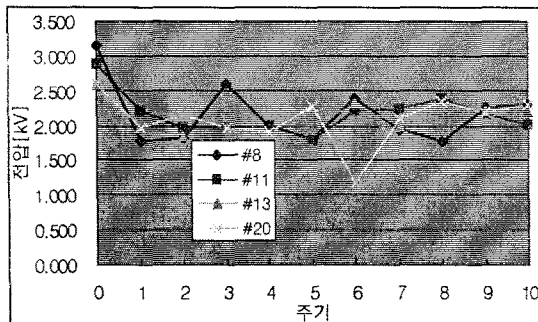
그림 4는 270℃-1.5일 열 열화된 샘플코일에 대해 각각 500, 1000, 1500, 2000(kV)의 전압을 인가하여 10주기간의 유전손실을 측정된 결과이다.

주변 온도나 습도에 의한 영향으로 다소간의 변동은 있지만 열화주기 진행에 따라 대체적으로 유전손실은 증가하는 경향을 나타내고 전압 상승에 따른 손실 증가의 폭은 점점 커지고 있음을 볼 수 있다. 그러나 열화에 따른 손실증가와 전압상승에 의한 tan δ 변화의 폭은 10% 이하로서 안정적인 절연성능을 유지하고 있다.

4.3 부분방전 특성



a) 개시전압



b) 소멸전압

그림 5. 열화 주기별 부분방전 특성의 변화

그림 5는 270℃-1.5일 열 열화된 샘플코일에 대한 부분방전 개시전압과 소멸전압을 나타낸 것으로서, 열화주기가 진행될 수록 부분방전 개시전압이 점점 낮아지고 있다. 그러나 10 주기가 지나도록 개시전압은 2000[V]를 상회하고 있어 안정적인 절연성능이 유지되고 있음을 나타내고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 도시철도차량 견인 전동기의 고정자 형권 샘플 코일을 제작하여 기존 가속 열 열화 수명평가 시험을 수행하였다. 우선 270℃-1.5일의 10 주기 열화 결과에서도 절연파괴는 일어나지 않았으며, 진단시험 결과에서도 절연저항이나 유전손실 특성의 현저한 저하 없이 부분방전 개시전압 또한 10주기 열화 이후에도 2kV 이상으로서 열 열화 따른 안정된 절연성능이 유지되고 있음을 확인 할 수 있었다. 이들 견인전동기 절연 시스템에 대한 장기 수명 예측 및 신뢰성 평가 결과는 향후 견인전동기의 효과적인 고장진단 및 예방보존에 큰 기여를 할 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] CEIDP, p.391, 1994
- [2] CEIDP, Virginia, P.4A-10, 1995
- [3] 8th ISH, Yokohama, p64.02, 1993
- [4] 9th ISH, Graz, p7857, 1995
- [5] Electra, No.32, pp.61-74, 1974
- [6] Electrical/Electronic Insulation Conference, Chicago, p.417, 1995
- [7] 1994 IAS, p.55, 1994
- [8] IEC Document 2/988/CD, November, 1995
- [9] IEC Document 34-15
- [10] IEC Document 34-17
- [11] IEC Document 34-18-1
- [12] IEC Document 34-18-31
- [13] IEC Document 34-18-32
- [14] IEC Document 34-18-33
- [15] IEC Document 349-2
- [16] IEC Pub 851(85), Part 1, 2, 5
- [17] IEC2(CO)566
- [18] IEC317-0-1(3/91), Part 0, Section 1
- [19] M.M.Skilling, *Transient Electric Currents*, McGraw Hill, 2nd Ed., pp.262-305, 1952
- [20] D.W.Novotiny & T.A.Lipo, *Vector Control and Dynamics of AC Drives*, Oxford Science Pub., pp.9-15, 1996
- [21] 한국철도기술연구원, 추진제어장치 연구개발보고서 (분야 : 견인전동기 기본설계 및 해석연구), 1997, 11.
- [22] NEMA Standard MG1-Part 30 (30.02.2.9)
- [23] 富士時報, Vol. 59, No. 6, p.395, 1986
- [24] 日本電氣學會 論文誌 B, 117卷, 第 8号, p.1167, 平成 9年
- [25] 日本電氣學會 全國大會, 4-298, 平成 9年