

**견인전동기의 고장예측 및 신뢰성 평가를 위한 복합가속열화 상태진단
- 절연저항 및 성극지수 특성 연구**

왕종배*, 변운섭, 백종현, 박현준
한국철도기술연구원 차량연구본부

**Condition Diagnosis by the Complex Accelerating Degradation for fault prediction & estimation of reliability on the traction motor
- Insulation Resistance & Polarization Index Properties**

Jong-Bae Wang*, Yoon-Sub Byun, Jong-Hyen Baek, Hyun-Jun Park
Korea Railroad Research Institute

Abstract - In this paper, sample coils for stator form-wound winding of traction motor were tested by the 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.

After aging of 10 cycles, insulation resistance and PI properties were investigated as diagnosis tests in the range of 20~160°C. Analysis of polarization properties was performed on the base of dc current-time change.

④ 환경적 요소 : 소음, 진동, 분진, 오염물, 화학제 등에 대한 내구성 확보

본 연구에서는 철도차량용 견인전동기가 가지는 공간상의 제약과 고온·고전압하의 스트레스에 대응할 수 있도록 표 1과 같이 폴리이미드(Kapton) 및 실리콘 수지를 주체로 한 200 Class 절연구성의 실제 설계요소를 모두 포함한 그림 1의 고정자 형코일 샘플을 제작하여 가속열화시험을 진행하였다.

표 1. 견인전동기용 200 Class 절연시스템의 특성

품명	사양 및 규격	
1. 200class 절연소재	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 형코일 샘플 제작	단절연 시험용 인출선 처리	소선별 인출선 절연보강 처리
	모의철심을 가진 샘플 코일 제작	동판슬롯구조의 모의철심 및 형코일 샘플 제작
3. VPI 합침처리	Silicone Resin 진공합침	합침 60°C-3hr 건조 200°C-16hr

1. 서론

전동차 추진제어장치에 사용되는 견인전동기는 속도제어가 용이한 고효율 운전이 가능하고, 빈번한 기동과 정지에 따른 과부하와 전원의 급변에도 잘 견딜 수 있는 전기적 특성을 구비해야 할 뿐 아니라 진동, 충격 및 먼지 등의 악조건 하에서도 충분히 견디며 유지보수가 편리한 구조를 가져야 한다.

최근 철도차량용 견인전동기는 효율적인 운전제어를 위해 IGBT와 같은 고속 스위칭 소자에 의한 PWM 제어방식으로 구동되면서 고속의 급준씨지에 의한 반사파 과전압과 고조파 스트레스가 고정자 권선에 가해져 정현파 구동과는 상이한 열화메카니즘으로 전동기의 장기수명과 신뢰성을 크게 위협하고 있는 실정이다.

철도차량용 견인전동기의 전체 수명주기에 걸친 신뢰성을 단기간에 평가하고 고장예방에 필요한 진단기술을 확보하기 위해서는 인버터 구동에 따른 다량의 반복 Switching 씨지와 주변환경(고온, 진동, 먼지, 흡습 등) 스트레스를 고려한 새로운 복합가속열화시험법의 개발과 권선절연의 상태진단에 의한 열화기구의 명확한 규명이 반드시 필요하다.

2. 본론

2.1 절연구성

철도차량용 견인전동기는 정격출력 200kW, 정격전압 1,100V 및 정격전류 130A로서 0~200kHz범위에서 VVVF 가변속 운전되므로 절연설계시 구동특성과 운전 환경에 따른 다양한 스트레스와 열화기구를 미리 파악하여 이에 대한 대책을 강구하는 것이 매우 중요하다.

특히 인버터 구동시 다음과 같은 절연설계 요소를 고려해야 한다.

- ① 전기적 요소 : 고속의 급준 씨지에 대한 내력 확보
- ② 기계적 요소 : 진동, 충격, 전자력에 대한 내력 확보
- ③ 열적 요소 : C중 절연능력 및 열방산능력 확보



그림 1. 제작된 형코일 샘플

2.2 인버터 구동시의 운전패턴 분석

(1) 반사파 과전압 인가 시간

그림 2의 VVVF 인버터 구동 견인전동기의 운전에서 반사파 과전압은 주로 PWM 운전(800Hz)시 발생되며, PWM 운전은 전동차 주행 패턴을 고려할 때 전체 운전 시간의 23/84 정도임.

$$t1(11sec) + t6(12sec) / Total(84sec) = 0.274$$

(2) 온도상승 및 운전시간

전동차는 하루 10시간을 최고온도로 운전함을 고려하며, 견인전동기의 내열등급은 200℃이지만 이것은 최대 허용온도이며 실제 정격 운전시의 포화온도는 180℃를 넘지 않는다.

따라서 운전수명 25년을 보장하기 위한 신뢰성 시험에서는 800Hz PWM 운전으로 20,550 시간(856 일), 180℃ 열적 조건으로 75,000 시간(3,125 일)의 조건이 고려되어야 한다.

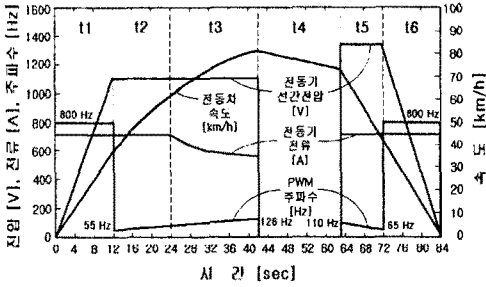


그림 2. 견인 전동기 운전패턴의 특성

(3) 기준 전압 레벨(pu) 결정

그림 3은 dc link 전압 1500V 인가시 견인전동기 단자에서의 과도전압 파형으로 최대피크전압 V_m 은 2700V이고 상승시간은 0.7 μ s 정도로 전형적인 IGBT 구동시의 특성을 보여주고 있다. 그리고 그림 4에서 상승시간 0.7 μ s일때의 반사파 비율 1.3배를 고려하여 전기적 열화에 필요한 기준 전압레벨(pu)을 산정하면

- ① 인버터 출력 피크 전압
 $U_{peak} = 1,500V(\text{가선}) + 600V(\text{spike전압}) = 2,100V$
- ② 반사파를 고려한 전동기 입력의 선간 피크전압
 $U_{i,peak} = 1.3 \times 2,100 V = 2,700V$
- ③ 인버터 구동 전동기 입력의 상 피크전압 변환
 $U_{p,peak} = 2,700V \times 2/3 = 1,800V$
- ④ 인버터 구동 전동기 입력의 상 실효전압
 $U_{Prms} = 1,800V / 1.414 = 1,270V_{rms}$

기준전압은 1pu = 1,270V_{rms}로서, 각 상권선 초입부분의 대지절연은 이 전압을 경험하게 된다.

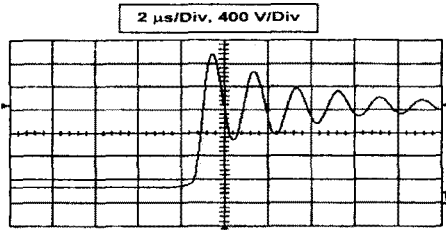


그림 3. 200kW, 1100V (1500Vdc) 견인전동기의 PWM 인버터 구동시 단자간 과도전압 파형

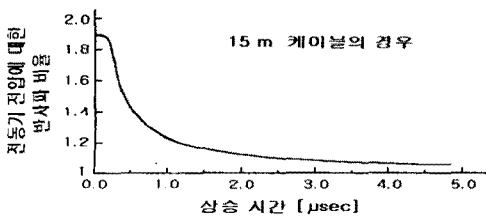


그림 4. 상승시간에 따른 반사파 비율

2.3 복합가속열화시험

최근 인버터 구동에 따른 전동기 절연시스템의 고조파와 반사파 과전압 문제에 관해 IEC 792나 NEMA MG-31 등의 규격에서 시험적인 시도를 소개하고 있지만, 불행히도 수kHz를 넘는 고속 스위칭시 권선절연의 안전한계와 예상수명을 보장하는 과도최대반복전압(V_m)과 상승율(dv/dt)을 규정하지는 못하고 있다. 또한 이들 규격은 저전압 비형권 전동기를 대상으로 한 것으로서 사용재료와 절연구성이 현저히 다른 고전압의 견인전동기 형코일 권선에 대해 이를 그대로 적용하기는 어려운 실정이다.

본 연구에서는 권선샘플을 이용하여 고온 열열화와 인버터 급준 과전압 열화를 복합적으로 수행할 수 있는 견인전동기 절연신뢰성 평가방법을 다음과 같이 제안한다.

(1) 열화 전 시험

① 육안 검사 : 시편의 상태 검사

② 고전압 시험 : 코일단자-대지 사이에 1분간 인가
 $2U_N(1,100V_{rms}) + 1kV = 3,200 V_{rms}$

③ 초기 진단시험(절연저항, $\tan \delta$, 부분방전 측정)

(2) 주기적 열열화 수행

본 연구에서는 200class 형코일 권선샘플에 대해 230℃-17.5일, 250℃-5일 및 270℃-1.5일의 열열화 조건으로서 총 10주기의 열적 가속열화를 진행하였다.

10℃ 수명반감칙에 의거한 열적 열화시험은 최고 허용온도 보다 높은 온도에서 각 선택 온도 차이가 20℃ 이상이 되도록 3가지 이상의 온도에서 열화시켜야 한다. 열화온도를 높게 선택하면 시험기간은 단축되지만 신뢰성에 대한 오차가 늘어나므로 적절한 온도를 선택하여 신뢰성과 시험시간에 대한 잇점을 살려야 한다.

표 2. 200 Class 가속열열화 조건

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

(3) PWM 임펄스 모의전압 인가

히트사이클 중격을 주기 위해 표 2에 설정된 열화온도로 예열된 오븐에 시편을 넣고, 꺼낼 경우도 그 온도에서 상온으로 그대로 꺼내어 상온까지 방치 한후, 스위칭 임펄스 전압을 모의하기 위해 임펄스 전압발생기를 이용하여 각 열화 주기마다 파두 0.1 ~ 0.2 μ s, 800Hz의 임펄스 3.5pu전압($= 3.5 \times 1,270V_{rms} = 4.5 kV_{rms}$)을 10분간 인가한다.

(4) 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) 1 시간 (단, 전압인가 없음)

(5) 침수시험 : 수돗물 30 분간 침수

(6) 내전압 인가

- 침수시험후 젖은 상태에서 내전압 인가
- 인가전압: 상용주파수 2,200V_{rms}, 10분

200 Class 절연시스템에 대한 상기조건외의 가속열화 시험에서 각 조건별로 10주기에 이르기까지 절연과파가 없으며 또한 특성의 현저한 저하없이 견디면 이는 25년의 수명을 보증하는 것이다.

2.4 절연진단시험-절연저항 및 성극지수 특성

전통적으로 직류 고전압 시험에 놓여지는 전기절연의 상태는 시험전압 인가 후 1분차 절연저항 및 그 성극지수로서 특성화된다. 절연저항 증가는 온도, 습도에 따른 장기적인 변화를 기록 유지하여 절연층의 흡습, 오손정도를 판단하는 전수시험 기반으로 수행되고 있다. 그러나 측정시의 환경조건인 온도와 습도에 의해 크게 의존하는 심각한 단점을 내포하고 있다.

그림 5와 6은 상기 2.3항의 10주기의 복합가속열화 스트레스를 받은 견인전동기 고정자 형코일에 대해 측정 온도 20°C-160°C사이에서 측정한 직류 1000V를 인가 시의 절연저항과 성극지수(PI) 특성을 나타낸 것이다.

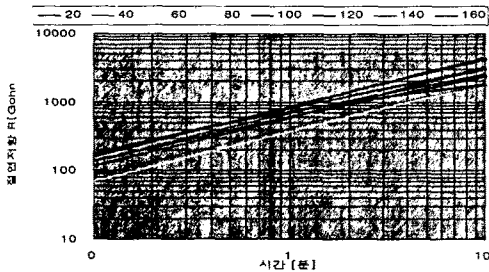


그림 5. 측정온도별 절연저항의 특성변화 (230°C-17.5일-10주기 열화 샘플)

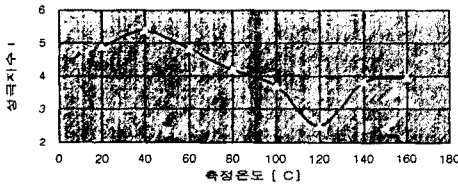


그림 6. 측정온도별 성극지수(PI) 특성변화 (230°C-17.5일-10주기 열화 샘플)

절연저항은 권선의 동과 대지간에 인가된 직류전압 (1000V)에 대한 결과전류의 비율로서, 3가지의 전류성분이 흐르게 된다: 즉 권선의 용량성에 의존하는 충전전류 성분, 절연물의 다양한 분자구조를 포함한 흡수전류 성분, 도체 표면과 대지간의 누설전류 성분으로 이루어진다. 앞의 두 전류성분은 시간 경과에 따라 급격히 감소하게 되며, 최종적으로는 권선절연물 표면의 흡습이나 더러움에 의존하는 누설전류성분만이 일정하게 남게 된다.

절연물의 열화진전 상태와 관계 있는 과도 충전전류 성분과 흡수전류를 분리하여 해석할 수 있는 다음과 같은 모델을 고려하고자 한다. 즉, 일정 직류전압의 인가에 의한 회전기 절연 스트레스의 과도흡수 또는 전도전류 I_A 는 다음의 일반형식을 따른다.

$$I_A = I_R + A \cdot t^{-1/2} + I_{01} \cdot e^{-eI_1 t} + I_{02} \cdot e^{-eI_2 t} + I_{03} \cdot e^{-eI_3 t}$$

여기서 I_R 은 영구전류 또는 연속전류를 나타내는데, 즉 분극전류에서 탈분극전류를 빼주는 것이며, 둘째 항 $A \cdot t^{-1/2}$ 는 절연물 엔드암 영역의 표면전류 분산 (dispersion)의 기여를 나타낸다. 잔여 3항은 주절연물이나 절연 직선부의 체적 또는 벌크 분극현상 기여를 나타내는 것으로서, 주절연 직선부를 통과해 흐르는 전류로서 3가지 상이한 시정수를 가진 3종류의 "저속"분극 기구에 의해 근사화 된다. 이 3종류의 분극기구는

- 함침수지내 저속 이온의 운동
- HV 절연물내에 존재하는 전기 전하의 완화
- 상이한 재료의 존재로 인한 계면분극 이다.

시험결과 평가를 위한 윗식의 적용 예를 그림 7과 8에 제시한다. 그림 7은 전압인가 몇 분 후 그 기기의 절연저항이 엔드권선 부분의 절연표면특성에 의해 조절되는 것을 명백히 보여준다. 사실상 더 긴 시간에서 $t^{-1/2}$ 법칙을 따른다는 사실에 주목한다.

그림 7의 시험결과에서 $t^{-1/2}$ 항을 제거하면 $\Delta(I_A - I_R)$ 전류를 얻는다. $\Delta(I_A - I_R)$ 전류는 3가지 지수항의 기여, 분극전류에 대한 벌크절연의 기여를 나타내는 것이다. 이는 세미로그척도의 그래프로 분석될 수 있다.

그림 8은 전류가 앞서 가정한 3가지 지수항으로 구성됨을 명백히 보여준다. 3종류의 시정수는 벌크 또는 주절연의 과도특성 접근을 허용하며, 이는 그 자체로 절연물 함침수지의 구조상태와 연관되는 것이다.

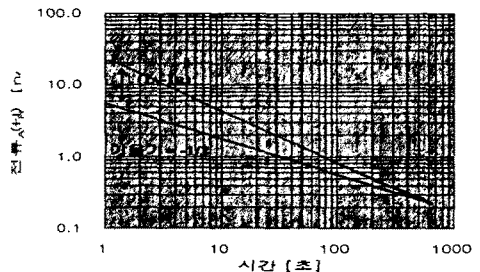


그림 7. 이중 로그척도의 분극전류 $I_A - I_R$ 시간 의존성

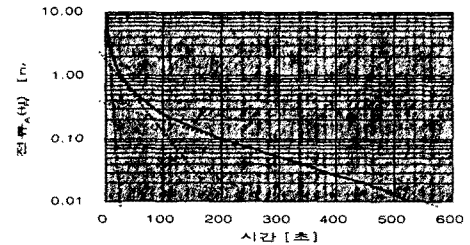


그림 8. 세미로그척도의 분극전류 $I_A - I_R$ 시간 의존성

3. 결 론

본 논문에서는 200kW, 1100V급 철도차량용 견인전동기의 실제 생산조건과 동일하게 제작된 폴리이미드 기반의 실리콘 레진 함침 C중(200class) 절연구조의 고정자 형코일을 대상으로 고속 인버터 스위칭에 따른 급준 과도씨지 전압스트레스, 고온가열 및 냉각에 의한 열충격 스트레스, 기계적 진동인가 및 침수시험 등을 조합한 주기적인 복합가속열화를 진행하였으며, 복합가속열화에 따른 견인전동기 형코일의 상태진단시험으로서 절연저항 및 성극지수(PI) 특성에 대한 온도 의존성을 조사하여 인버터구동 전동차용 견인전동기의 고장예측 및 운전 신뢰성을 평가하고자 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] IEC Document 34-17
- [2] IEC Document 34-18-1
- [3] IEC Document 34-18-31
- [4] IEC317-0-1(3/91), Part 0, Section 1
- [5] M.M.Skilling, *Transient Electric Currents*, McGraw Hill, 2nd Ed., pp.262 -305, 1952
- [6] 한국철도기술연구원, 추진제어장치 연구개발보고서 (분야: 전동차 AC견인전동기 표준설계), 1999. 12.
- [7] NEMA Standard MG1-Part 30 (30.02.2.9)
- [8] 日本電氣學會 全國大會, 4-298, 平成 9年