

## 견인전동기의 복합가속열화 상태진단에 의한 고장예측 및 신뢰성 평가

### Fault Prediction & Reliability Estimation of the Traction Motor by the Complex Accelerating Degradation and Condition Diagnosis

왕중배\*, 김명룡  
(Jong-Bae Wang\*, Myong-Yong Kim)

#### Abstract

In this paper, stator form-winding sample coils based on silicone resin and polyimide were made for fault prediction and reliability estimation on the 200 Class insulation system of traction motors. The complex accelerative degradation was performed by periods during 10 cycles, which was composed of thermal stress, fast rising surge voltage, vibration, water immersion and overvoltage applying. After aging of 10 cycles, condition diagnosis test such as insulation resistance & polarization index, capacitance & dielectric loss and partial discharge properties were investigated in the temperature range of 20~160°C. Relationship among condition diagnosis test was analyzed to find an dominative degradation factor and an insulation state at end-life point.

**Key Words(중요용어)** : Accelerating degradation, Condition diagnosis, Switching Surge, Traction motor

#### 1. 서 론

최근 IGBT와 같은 대전력 고속 스위칭에 의한 인버터의 성능개선과 효율적인 VVVF운전 제어가 가능하여 철도차량용 견인전동기도 3상 농형 유도전동기가 표준으로 자리잡아 가고 있으며, 열악한 운전 환경(진동, 고온, 먼지, 철분, 기름 등)과 최소한의 정비상태에서 20년을 상회하는 운전 수명을 보장하도록 규정하고 있다.

그러나 인버터 구동에 따른 고속 스위칭 켜지나 고조파와 같은 추가적인 스트레스가 견인전동기 절연시스템의 수명을 크게 위협하는 것으로 밝혀지면서 전체 수명주기에 걸친 신뢰성을 단기간에 평가하

고 고장예방에 필요한 진단기술을 확보하기 위해 인버터 구동에 따른 다량의 반복 Switching 켜지와 주변환경(고온, 진동, 먼지, 흡습 등) 스트레스를 고려한 새로운 복합가속열화시험법의 개발과 권선절연의 상태진단에 의한 열화기구의 명확한 규명이 반듯이 필요하다.

#### 2. 절연구성 및 스트레스 분석

##### 2.1 견인전동기의 절연구성

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

본 연구에서는 철도차량용 견인전동기가 가지는 공간상의 제약과 고온·고전압하의 스트레스에 대응

\* 한국철도기술연구원 차량연구본부  
(경기도 의왕시 월암동 374-1, 우437-050)  
Fax: 0343-461-8561  
E-mail : jbwang@krii.re.kr

할 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 구성

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

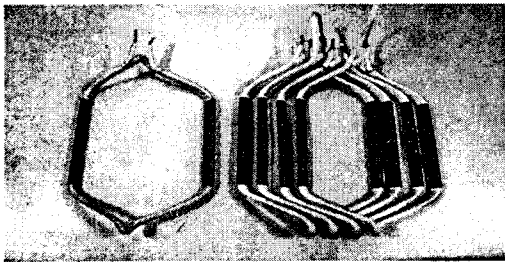


그림 1. 제작된 형코일 샘플 사진

## 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 전체시간의 약 1/3 정도이다.

$$t1(11\text{sec})+t6(12\text{sec})/\text{Total}(84\text{sec})=0.274$$

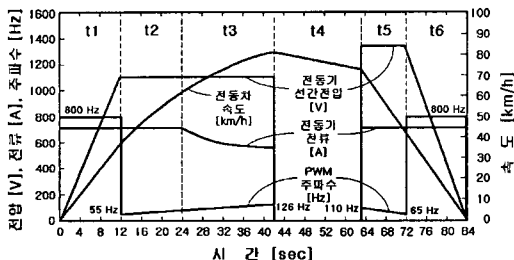


그림 2. 인버터구동 견인전동기의 운전패턴

### (2) 온도상승 및 운전시간

전동차는 하루 10시간을 최고온도로 운전함을 고려하며, 견인전동기의 실제 정격운전시의 포화온도는 180°C를 넘지 않는다. 따라서 운전수명 25년을 보장하기 위한 신뢰성 시험에서는 800Hz PWM 운전으로 20,550 시간(856 일), 180 °C 열적 조건으로 75,000 시간(3,125 일)의 조건이 고려되어야 한다.

### (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 $\mu$ s 정도로 전형적인 IGBT 구동시의 특성을 보여주고 있다.

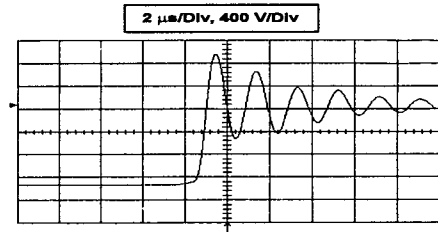


그림 3. 200kW, 1100V (1500Vdc) 견인전동기의 PWM 인버터 구동시 단자간 과전압 파형

그림 4에서 상승시간 0.7 $\mu$ sec일때의 반사파 비율 1.3배를 고려하여 전기적 열화에 필요한 기준전압은 1pu=1,270V<sub>rms</sub>로서, 각 상권선 초입부분의 대지절연은 이 전압을 경험하게 된다

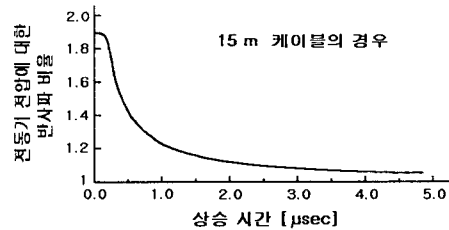


그림 4. 상승시간에 따른 반사파 비율

## 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.

본 연구에서는 2장의 절연구성과 인버터 구동시의 견인전동기 열화특성을 고려하여 20년의 수명보장을 위해 그림5의 절차로 가속열화시험법을 진행하였다.

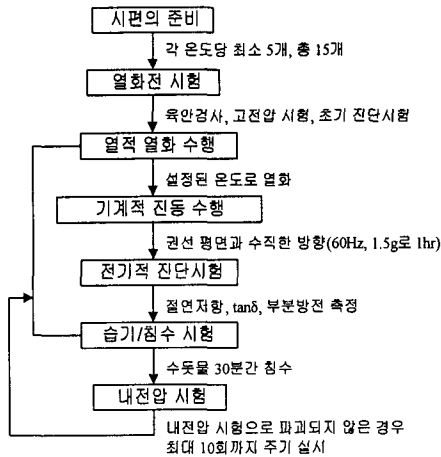


그림 5. 200 Class 절연시스템의 복합가속열화 절차

(1) 열열화 조건의 설정

10℃ 수명반감칙에 의거한 열적 열화시험은 최고 허용온도 보다 높은 온도에서 각 선택 온도 차이가 20℃ 이상이 되도록 3가지 이상의 온도에서 열화시켜야 한다. 본 연구에서는 200 class 형코일 권선샘플에 대해 표 2와 같이 총 10주기의 열적 가속열화를 진행하였다.

(2) PWM 임펄스전압 모의

인버터 스위칭 임펄스 전압을 모의하기 위해 각 열화주기마다 파두 0.1~0.2μsec, 800Hz의 임펄스 3.5pu전압(=3.5×1,270V<sub>rms</sub>=4.5 kV<sub>rms</sub>)을 10분간 인가한다

표 2. 200 Class 가속열열화 조건

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

4. 절연진단 특성분석

4.1 절연진단 시험조건 및 사용장비

3장의 10주기의 가속열화를 모두 마친 후 절연상태진단을 위해 표 2의 열화샘플에 대해 유전특성의 온도의존성 및 전압의존성, 부분방전 개시전압 및 소멸전압을 조사하였다. 측정온도는 노이즈 차폐용

오븐을 사용하여 온도범위 20℃~160℃에 걸쳐 20℃ 단위로 설정하였으며, 각 온도마다 1시간의 안정화 시간을 두었다.

절연저항 측정은 직류 1000V를 코일 동선과 대지간에 인가하고 electrometer(Keithley model 6517A)와 recorder를 이용하여 12분간의 전류변화를 측정, 기록하였다. 그리고 1분치와 10분치 절연저항 값으로부터 성극지수(PI)를 계산하였다.

유전특성시험은 각 온도마다 60Hz의 정현파 전압을 250V~2250V까지 250V 단위로 상승시키면서 Tettex사 Capacitance & dielectric loss 측정장치 (Type 2809)를 사용하여 측정하였으며, 유전특성 측정 이후 Robinson사 PD detector(Model 803.1) 및 분석 시스템(CDA-3)을 사용하여 부분방전 특성을 측정하였다.

4.2 절연저항 및 성극지수 특성

그림 6과 7은 상기 2.3항의 10주기의 복합가속열화스트레스를 받은 견인전동기 고정자 형코일에 대한 절연저항과 성극지수(PI) 특성을 나타낸 것이다.

절연저항은 3가지의 전류성분이 흐르게 된다; 즉 권선의 용량성에 의존하는 충전전류성분, 절연물의 다양한 분자구조를 포함한 흡수전류 성분, 도체 표면과 대지간의 누설전류 성분으로 이루어진다. 앞의 두 전류성분은 시간경과에 따라 급격히 감소하며, 최종적으로는 권선절연물 표면의 흡수이나 더러움에 의존하는 누설전류성분만이 일정하게 남게된다.

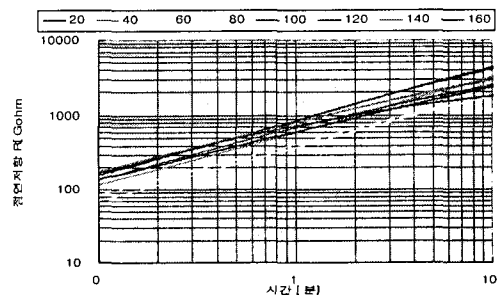


그림 6. 측정온도별 절연저항의 특성변화 (230℃-175일 열화 샘플)

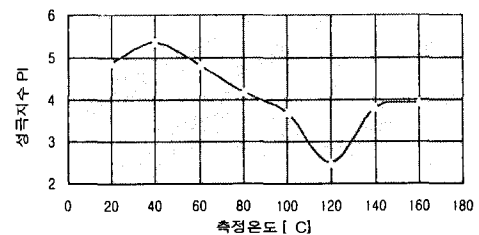


그림 7. 측정온도별 성극지수(PI) 특성변화

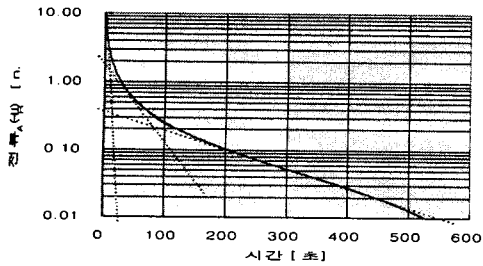


그림 8. 분극전류 Δ(I<sub>A</sub>-I<sub>R</sub>)의 성분 분리

과도흡수 I<sub>A</sub>는 다음의 일반형식을 따른다.

$$I_A = I_R + A \cdot t^{-1/2} + I_{01} \cdot e^{-t/\tau_1} + I_{02} \cdot e^{-t/\tau_2} + I_{03} \cdot e^{-t/\tau_3}$$

여기서 I<sub>R</sub>은 연속전류, A.t<sup>-1/2</sup>항은 표면전류 분산, 잔여 3항은 체적 또는 벌크 분극현상 기여이다.

윗 식에서 t<sup>-1/2</sup> 항을 제거하면 3가지 지수항의 기여 Δ(I<sub>A</sub>-I<sub>R</sub>) 전류를 얻는데, 분극전류에 대한 벌크결연의 기여를 나타내는 것이다. 그림 8은 전류가 앞서 가정한 3가지 지수항으로 구성됨을 명백히 보여주며, 이는 절연물 함침수지의 구조상태와 연관된다.

#### 4.3 유전특성의 온도 및 전압 의존성

그림 9는 230℃-175일 열화샘플의 정전용량과 유전손실의 온도의존성을 나타낸 것으로, 40℃, 110℃ 및 200℃이후의 3개의 손실피크가 존재한다.

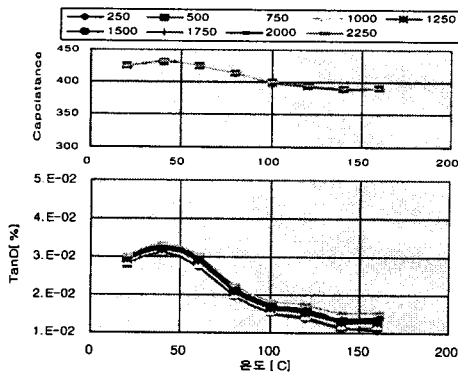


그림 9. 230℃-175일 복합가속열화된 샘플에 대한 정전용량과 유전손실의 온도의존성

그림 10은 전압상승에 따른 정전용량과 유전손실의 변화가 거의 없는 안정한 특성을 나타내고 있다. 250℃-50일 열화샘플은 다른 것에 비해 약간 큰 손실이 나타나며, 230℃-175일 열화샘플이 가장 열화 정도가 약하게 진전되어 있음을 알 수 있다.

한편, 절연저항특성과의 비교에서 1분치 절연저항은 충전전류 성분이 지배하므로 유전특성의 정전용량 변화와 유사하며, 성극지수의 변화는 유전손실의 온도변화와 거의 일치하는 특성을 보여주고 있다.

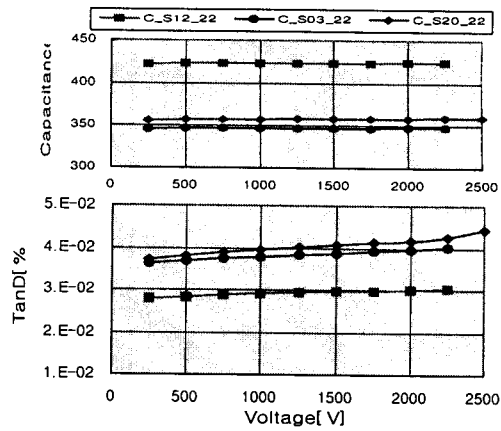


그림 10. 230℃-175, 250℃-50일 및 270℃-15일 복합가속열화 샘플의 전압의존성(20℃측정)

#### 4.4 부분방전특성

그림 11은 230℃-175, 250℃-50일 및 270℃-15일의 복합가속열화된 샘플에 대해 20℃에서 측정된 부분방전 방전량과 개시전압 특성을 비교한 것이다. 최대 방전량 비교에서 250℃-50일 열화조건이 1200 [pC]에 이르는 가장 심각한 열화를 받았음을 알 수 있으며, 부분방전 개시전압도 가장 낮게 나타났다.

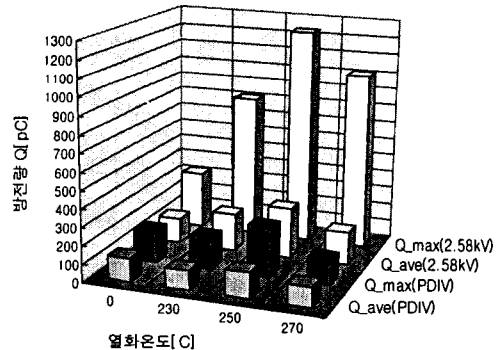


그림 11. 복합가속열화 샘플의 부분방전 특성비교

## 6. 결 론

본 논문에서는 VVVF 인버터로 구동되는 200kW 급 견인전동기의 고정자 형코일을 대상으로 고장예측 및 운전 신뢰성을 평가하고자 고속 인버터 스위칭에 따른 과도써지, 열충격, 진동인가 및 침수시험 등을 조합한 주기적인 복합가속열화를 진행하였다. 그리고 복합가속열화에 따른 견인전동기 형코일의 절연상태 진단시험에서 온도 및 전압 의존성을 분석하여 견인전동기의 적정 유지보수 상태기준을 제시하고 이력관리의 기준자료로서 활용하고자 하였다.