

전기철도용 견인전동기의 복합가속열화 상태진단에 관한 연구

A Study on the Complex Accelerating Degradation and Condition Diagnosis of Traction Motor for Electric Railway

왕종배*
(Jong-Bae Wang)

Abstract

In this study, the stator form-winding sample coils based on silicone resin and polyimide were made for fault prediction and reliability estimation on the C-Class(200°C) insulation system of traction motors. The complex accelerative degradation was periodically performed during 10 cycles, which was composed of thermal stress, fast rising surge voltage, vibration, water immersion and overvoltage applying. After aging of 10 cycles, the 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 tests was analyzed to find a dominative degradation factor and an insulation state at end-life point.

Key Words : Electric railway, Traction motor, Form-winding sample coil, C-Class Insulation, Accelerating degradation, Condition diagnosis.

1. 서 론

고속철도 및 지하철 등 전기철도차량의 추진제어 장치에 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[1]. 최근 대전력 인버터의 성능개선과 효율적인 VVVF 운전제어 기술의 발달로 전기철도용 견인전동기로서 3상 농형 유도전동

기가 표준으로 자리잡아 가고 있으며, 열악한 운전 환경(진동, 고온, 먼지, 철분, 기름 등)과 최소한의 정비상태에서 20년을 상회하는 운전수명이 보장되어야 한다[2].

일반적으로 전기철도용 견인전동기는 전함침구조의 절연구성을 가지기 때문에 절연시스템의 고장은 곧바로 전동기의 최종수명을 결정하는 중요 요인이며, 특히 빈번한 기동·정지와 충격이 가해지는 운행조건과 고속 스위칭 제어에 의한 과도전압 및 고조파 스트레스는 일반 산업용 전동기와는 상이한 열화 메카니즘으로 견인전동기의 최종 수명과 운전 신뢰성을 크게 위협하는 것으로 알려지고 있다[3-5].

본 연구에서는 정격출력 200 kW급 전기철도용 견인전동기의 복합가속열화 상태진단에 의한 고장예측 및 운전 신뢰성을 평가하고자 C종 절연구성을 가진 실리콘 레진 함침된 실제 견인전동기 고장자형코일을 제작하였으며, 이를 대상으로 운행환경을 고려한

* 한국철도기술연구원

철도안전성능시험인증센터 안전시스템연구팀
(경기도 의왕시 월암동 374-1, 우437-050)

Fax: 0343-461-8561, E-mail : jbwang@krri.re.kr
2001년 11월 12일 접수, 2001년 11월 16일 1차심사완료
2001년 11월 22일 2차심사완료

고온가열 및 냉각에 의한 열 충격 스트레스, 인버터 스위칭을 모의한 급준 과전압 스트레스, 기계적 진동인가 및 침수조건 등이 조합된 전기철도의 20년 운전에 해당하는 복합스트레스를 10주기에 걸쳐 인가하는 복합가속열화 시험법을 개발하여 적용하였다. 그리고 복합가속열화에 따른 견인전동기 절연시스템의 열화상태진단을 위해 절연저항시험, 유전손실특성 및 부분방전 특성을 조사하였으며, 끝으로 10주기의 복합가속열화를 마친 수명 중점에서의 절연시스템 상태진단 특성에 대한 온도 및 전압 의존성을 분석하여 전기철도용 견인전동기의 최종 고장판정 기준확립 및 운전 신뢰성 평가에 활용하고자 한다.

2. 절연구성 및 스트레스 분석

2.1 견인전동기의 절연구성

본 연구에 적용된 전기철도용 견인전동기는 정격 출력 200 kW, 정격전압 1,100 V 및 정격전류 130 A로서 0~200 kHz범위에서 VVVF 가변속 운전되며, 병렬 Y-결선의 2층 배열 "다이아몬드" 형 코일의 권선구조를 채택하여 턴수 증가에 의한 고조파 표피효과를 저감시켰고, 절연시스템 설계는 차량하부의 공간상의 제약과 운전조건을 고려하고 인버터 써지 스트레스와 부분방전에 견딜 수 있는 충분한 대기간 절연여유를 가지도록 하였다[6].

표 1. 견인전동기용 고정자 형코일의 C종 절연구성.
Table 1. C-class insulation composition of stator form coil for traction motor.

품 명	사양 및 규격	
1. C종 절연 구성재료	소선절연물	Kapton코팅처리
	대지절연물	Kapton Film Nomex-aramid paper
	함침수지절연	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. VPI처리	Silicone Resin 진공함침	함침 60℃-3hr 건조 200℃-16hr

복합가속열화용 샘플은 실제 견인전동기에 사용되는 형코일을 이용하여 제작하였으며, 절연시스템은 표 1에서 제시한 것처럼 폴리이미드(Kapton)를 주체로 한 C종 절연구성물을 실리콘 수지로서 최종 진공함침(VPI) 처리하여 높은 열안정성, 진동 및 오염 조건에서의 내력을 강화하였고, 충분한 절연보강에 의해 인버터 구동에 따른 신뢰성을 확보하였다. 그림 1은 제작된 형코일 샘플의 사진이다.

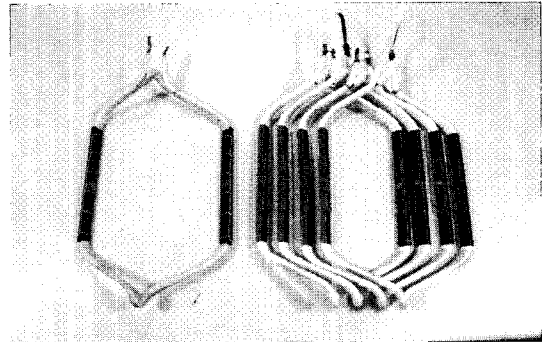


그림 1. 견인전동기용 형코일 샘플.
Fig. 1. Form coil samples for traction motor.

2.2 인버터 구동 스트레스 분석

고속 스위칭 인버터 구동에 따른 문제점으로서 고조파의 발생과 인버터와 전동기간의 케이블 길이 증가에 따른 반사와 과전압이 포함된 급준 과도 써지 충격이 문제점으로 지적되고 있다[7,8.] 특히, IGBT와 같은 고속 스위칭 소자를 적용한 인버터로 견인전동기를 구동하는 경우 스위칭 과전압 써지가 발생하고, 인버터와 전동기간의 임피던스 차이에 의해 케이블 길이에 따라 증가하는 반사와 과전압이 중첩되며, 더욱이 과전압의 상승시간이 1 μs 이하로 빠른 경우 과전압의 대부분이 전동기 권선 초입부에 집중되어 부분방전에 의한 절연열화를 유발하게되며, 높은 dV/dt로 축전압이 상승하여 베어링 절연부의 파괴를 초래한다.

(1) PWM 인버터 구동시의 과전압 파형 및 기준 전압(pu) 설정

그림 2는 dc link 전압 V_{dc}=1500 V를 인가하여 PWM 인버터로 구동되는 견인전동기 단자에서 측정 한 선간전압 파형으로서, 피크전압 V_m=2700 V이고 상승시간 tr=0.7 μs 정도의 전형적인 IGBT 구동시의 과도전압 특성을 나타내고 있다.

전기적 열화에 필요한 기준 전압레벨(pu)은 그림 3에서 상승시간 0.7 μs에서의 반사파 비율 1.3배를

고려하여 산정하면 기준전압 $1pu=1,270V_{rms}$ 가 되며, 각 상권선 초입부분의 대지절연은 PWM 인버터 구동시 언제나 이 전압을 경험하게 된다[9].

① 인버터 출력 피크 전압

$$U_{peak}=1,500 V_{dc}(가선)+600 V(\text{spike전압})=2,100 V$$

② 반사파를 고려한 전동기 입력의 순간 피크전압

$$U_{L,peak}=1.3 \times 2,100 V = 2,700 V$$

③ 인버터구동 전동기 입력 피크전압 및 실효전압

$$U_{P,peak}=2,700 V \times 2/3=1,800 V,$$

$$U_{Prms} = 1,800V/\sqrt{2} \approx 1,270 V_{rms}$$

(2) 과전압 인가 시간

그림 4는 VVVF 인버터 구동 견인전동기의 전형적인 운전패턴으로서 여기서 최대 과전압은 주로 t1과 t6 구간의 PWM 운전(800Hz)시에 발생되며, 전체

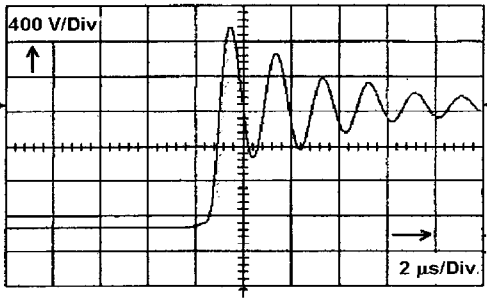


그림 2. 1500Vdc 인가시 PWM 구동 견인전동기의 단자간 과전압 파형.

Fig. 2. Transient voltage wave on the terminals of motor driven by PWM in 1500Vdc.

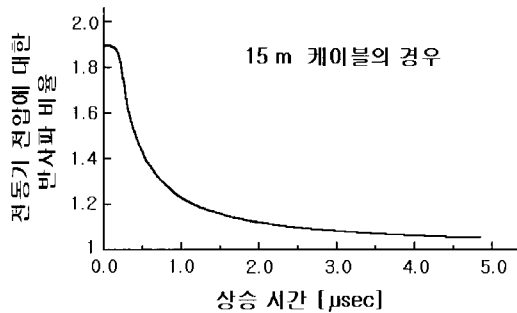


그림 3. 상승시간에 대한 반사파 비율.

Fig. 3. Ratio of reflection wave to rise time.

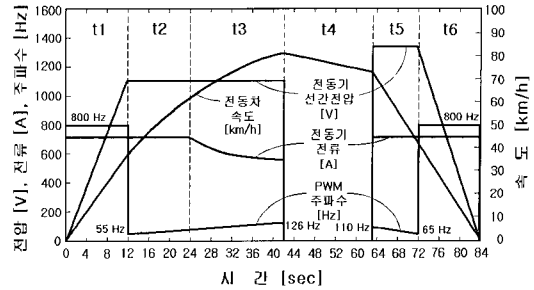


그림 4. 인버터구동 견인전동기의 운전패턴.

Fig. 4. Operating pattern of traction motors driven by inverter.

운전시간의 약 1/3 정도를 차지한다.

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

(3) 온도상승 및 운전시간

전기차량의 견인전동기 운전은 하루 10시간을 최고온도로 운전함을 고려하며, 전동기의 내열등급은 200 °C이지만 이것은 최대 허용온도이며 실제 정상 운전시의 포화온도는 180 °C를 넘지 않는다. 따라서 운전수명 25년을 보장하기 위한 가속열화 조건으로서 800Hz PWM 운전으로 20,550시간(856일), 180 °C 온도로 75,000시간(3,125일)의 조건을 고려해야 한다.

3. 복합가속열화 및 상태진단시험

3.1 복합가속열화시험법 개발

최근 인버터 구동에 따른 전동기 절연시스템의 고조파와 반사파 과전압 문제에 관해 IEEE 792[10]나 NEMA MG-31[11] 등의 규격에서 시험적인 시도를 소개하고 있으며, 각종 절연열화 수명평가방법을 규정하고 있지만 불행히도 이들 규격은 모두 최고절연등급으로서 H중에 대한 정현파 구동만을 고려한 것이다. 이들 규격은 전기철도용 견인전동기와 같이 수 kHz를 넘는 고속스위칭과 180 °C를 초과하는 절연등급의 안전한계나 예상수명을 보장하는 과도최대 반복전압(V_m) 및 상승율(dV/dt)을 규정하지 못하고 있어, 구동방식과 절연구성이 현저히 다른 전기철도용 견인전동기에 적용하는 것이 곤란한 실정이다.

본 연구에서는 C종 절연구성과 인버터 구동시의 견인전동기 열화특성을 고려하여 그림 5와 같은 복합가속열화시험법을 개발하였고, 이를 인버터 구동 견인전동기의 20년을 상회하는 수명보장과 고장진단 시험에 적용하였다.

(1) 열적 열화 조건의 설정

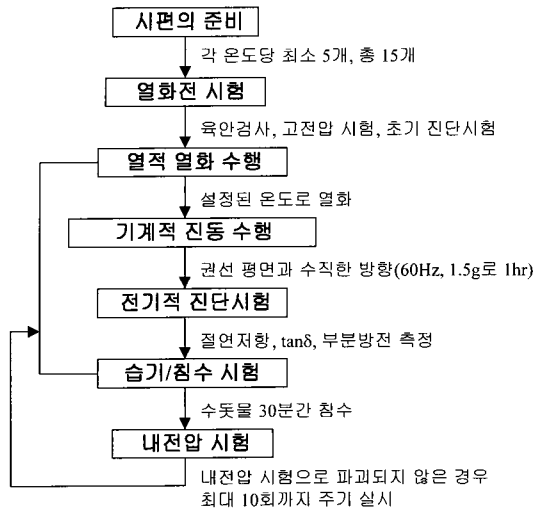


그림 5. C종 절연시스템의 복합가속열화 절차.
 Fig. 5. Procedure of complex accelerated degradation on the C-Class insulation system.

표 2. C종 절연 형코일 샘플의 가속열화 조건.
 Table 2. Accelerated thermal aging condition of C-class insulation form coil sample.

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

10℃ 수명반감칙에 의거한 열적 열화시험은 최고 허용온도 보다 높은 온도에서 각 선택 온도 차이가 20℃ 이상이 되도록 3가지 이상의 온도에서 열화시켜야 한다[12]. 본 연구에서는 C종 형코일 권선샘플에 대해 표 2와 같이 총 10주기의 열적 가속열화를 진행하였다.

(2) PWM 모의 전압 인가

인버터 스위칭 PWM 전압을 모의하기 위해 각 열화주기마다 파두 0.1~0.2 μs, 800 Hz의 스위칭 임펄스 전압 3.5pu(=3.5×1,270 V_{rms}=4.5 kV_{rms})를 10분간 인가하였다.

3.2 진단시험 및 사용장비

표 2의 조건으로 10주기의 가속열화를 모두 마친 후 절연상태진단을 위해 유전특성의 온도의존성 및

전압의존성, 부분방전 개시전압 및 소멸전압을 조사하였다[13]. 측정온도는 노이즈 차폐용 오븐을 사용하여 온도범위 20~160℃에 걸쳐 20℃ 단위로 설정하였으며, 각 온도마다 1시간의 안정화 시간을 두었다.

절연저항 측정은 직류 1000 V를 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 250~2250 V까지 250 V 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. 결과 및 검토

4.1 절연저항 및 성극지수 특성

그림 6은 직류 1000 V를 인가하여 40℃에서 측정된 분극전류의 시간 의존성을 이중로그 척도로 나타낸 것으로서, 10주기의 복합가속열화를 마친 후 수명 중점에서의 절연저항 특성을 살펴볼 수 있다.

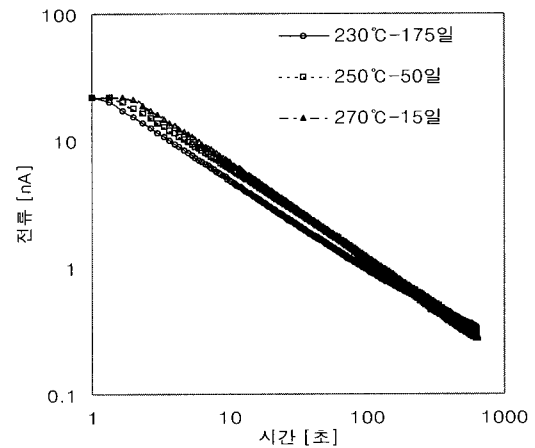


그림 6. 이중로그 척도의 분극전류 시간의존성(직류 1000V 인가, 40℃측정).
 Fig. 6. Time-dependency of polarization current by log-log scale (measured in 40℃ applying DC 1000V).

그림 7은 측정온도 40~160 °C 사이의 절연저항 특성의 온도 의존성 나타낸 것으로서, 현재 Megger에 의한 절연저항 측정은 1분치 절연저항을 측정하여 이를 40°C 기준으로 환산하여 흡습이나 오손정도를 판단하는 전수시험 기반으로 수행되고 있으나, 측정시의 환경조건과 절연물 표면의 온도 및 습도 상태에 크게 의존하기 때문에 1분치 절연저항의 단순 비교로는 절연물의 열화정도를 파악할 수 없다 [14].

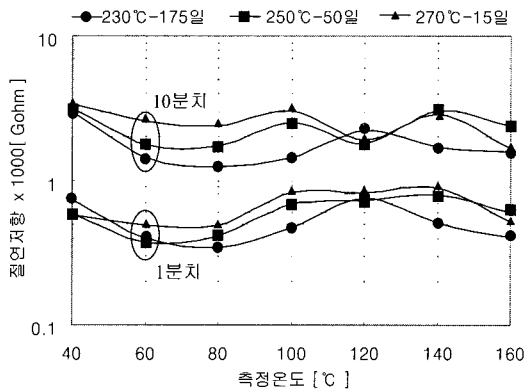


그림 7. 절연저항 특성의 온도 의존성.
Fig. 7. Temperature dependency of insulation resistance.

그림 8은 측정온도 40~160°C 사이의 1분치 절연저항(주로 흡수전류의 기여)과 10분치 절연저항(주로 표면누설전류의 기여)의 비율인 성극지수(PI) 특성을 제시한 것이다. 측정온도 상승에 따라 절연물의 열화 정도를 반영하는 성극지수는 전반적으로 감소하였음을 알 수 있으며, 복합가속열화 조건에 따른 특성 비교에서 측정온도 120 °C 까지는 175일-50일-15일의 열화순서로 절연저항 및 성극지수가 저하하는 것을 볼 때, 인가시간이 절연저항 특성 저하에서 지배적인 인자임을 알 수 있다.

절연저항 특성으로부터 열화상태를 분석하기 위해서는 측정된 누설전류에서 과도충전전류와 흡수전류를 분리하여 해석하여야 하는데, 여기서 과도충전전류는 재료고유의 정전용량의 기여이고 흡수전류는 절연물 자체의 체적 또는 벌크 분극현상의 기여에서 나타나는 것으로서, 다음과 같은 상이한 시정수를 가진 "저속"분극 기구로 근사화 할 수 있다[15].

- 함침수지내 저속 이온의 운동
- HV 절연물내에 존재하는 전기전하의 완화

- 상이한 재료의 존재로 인한 계면분극

과도흡수 I_A 는 다음의 일반형식을 따른다.

$$I_A = I_R + A \cdot t^{-1/2} + I_{01} \cdot e^{-e/t_1} + I_{02} \cdot e^{-e/t_2} + I_{03} \cdot e^{-e/t_3}$$

여기서 I_R 은 연속전류, $A t^{-1/2}$ 항은 표면전류 분산, 잔여 3항은 체적 또는 벌크 분극현상 기여이다.

그림 9는 230°C-175일 열화샘플에 대해 분극기구를 분리하기 위하여 상기 식으로부터 과도충전전류와 흡수전류를 분리하는 방법을 제시한 것으로서, 표면전류의 분산의 기여인 $A t^{-1/2}$ 항을 제거하면 3종류 지수항의 기여인 $\Delta(I_A - I_R)$ 전류를 얻을 수 있다

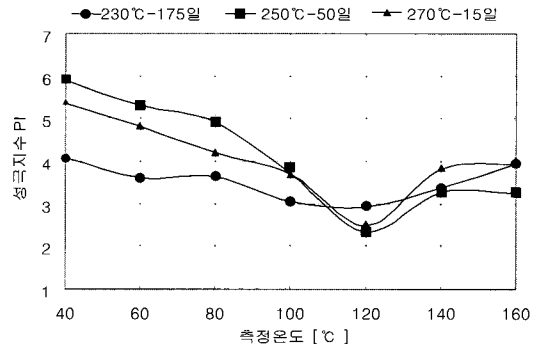


그림 8. 성극지수(PI) 특성의 온도 의존성.
Fig. 8. Temperature dependency of polarization index(PI).

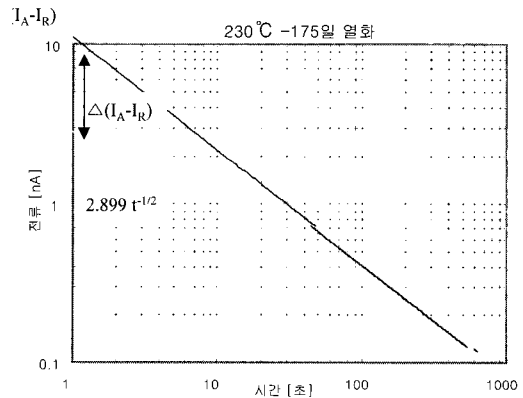


그림 9. 분극전류 $\Delta(I_A - I_R)$ 의 성분분리를 위한 이중로그척도(230°C-175일 열화샘플, 40°C 측정).

Fig. 9. The log-log scale plot for component separation of polarization current $\Delta(I_A - I_R)$ (measured in 40°C on the degraded sample during 230°C-175days).

며, 이는 분극전류에 대한 벌크 절연의 기여를 나타내는 것이다,

그림 10은 분극전류가 앞서 가정한 3종류의 지수항으로 구성됨을 명백히 보여주고 있으며, 이와 같이 분극기구의 성분분리와 완화시간의 분석을 통해 절연물의 구조상태와 열화 정도를 파악할 수 있다. 현재 누설전류의 성분분리에 의한 절연열화 상태진단 연구가 진행 중에 있다.

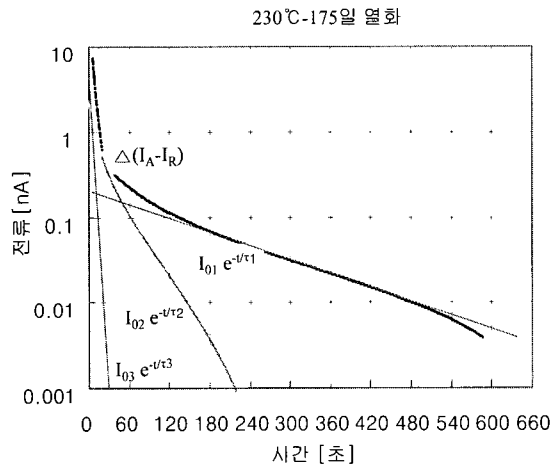
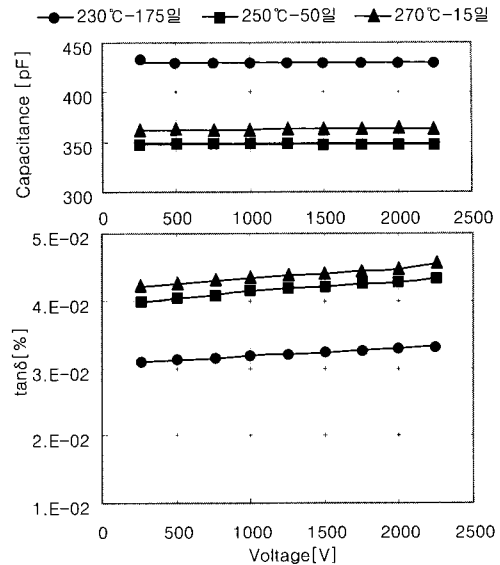


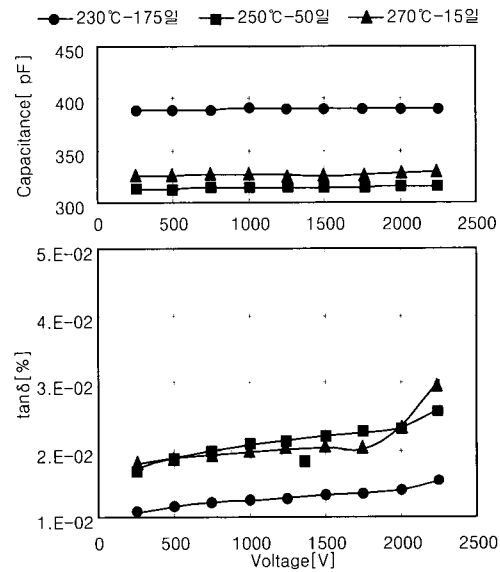
그림 10. 분극전류 $\Delta(I_A - I_R)$ 의 성분분리를 위한 세미 로그척도(230°C-175일 열화샘플, 40°C측정).
 Fig. 10. The semi-log scale plot for component separation of polarization current (measured in 40°C on the degraded sample during 230°C-175days).

4.3 유전특성의 온도 및 전압 의존성

그림 11은 10주기의 복합가속열화를 마친 후 수명 중점에서의 유전특성을 조사하기 위해 40 °C와 160 °C에서 측정된 유전특성의 인가전압 의존성을 나타낸 것이다. 2000 V 까지는 전압상승에 따른 정전용량과 유전손실의 변화가 거의 없는 안정적인 특성을 나타내고 있다. 가속열화 조건별 비교에서는 “230°C-175일” 열화샘플이 가장 열화정도가 약하게 진전되어 있음을 알 수 있으며, 250 °C의 열화온도를 경계로 정전용량의 저하나 유전손실의 증가가 230 °C 열화조건과는 현격한 차이가 있음을 알 수 있다. 특히 그림 11.(b)의 160 °C 측정온도에서 “250°C-50일” 열화샘플의 유전손실이 가장 크게 나타나고 있는데, 전반적인 열화정도가 가장 심각한 상태인 것으로 여겨진다.



(a) measured in 40°C



(b) measured in 160°C

그림 11. 복합가속열화 샘플에 대한 정전용량과 유전손실의 전압의존성.
 Fig. 11. Voltage dependency of capacitance & dielectric loss on the complex accelerating degradation sample.

그림 12는 1000 V 인가전압에서의 “230℃-175일”, “250℃-50일” 및 “270℃-15일” 복합가속열화 샘플에 대한 정전용량과 유전손실의 온도의존성을 나타낸 것이다. 정전용량은 측정온도 상승에 따라 점차로 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 가속열화 조건에 따른 특성 비교에서 샘플의 내열특성은 C종 절연물의 한계온도로 여겨지는 250 ℃를 경계로 급격히 저하하는 것을 알 수 있다. 특히 “250℃-50일” 열화조건의 정전용량이 가장 크게 저하한 것으로 나타나 250 ℃의 내열한계를 넘는 경우에는 열화기간의 영향이 전체적인 절연물의 구조열화에 더 크게 작용하는 것을 알 수 있다.

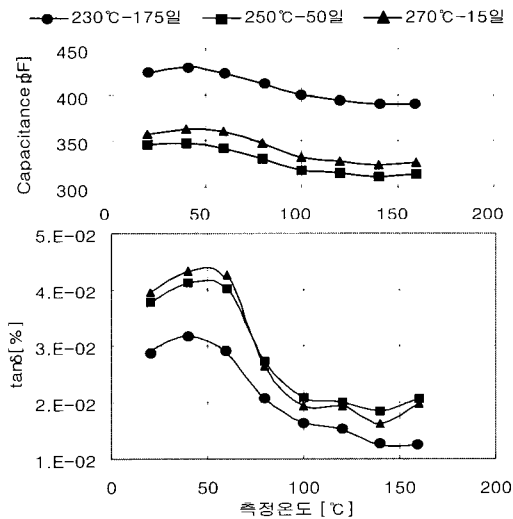


그림 12 복합가속열화 샘플에 대한 정전용량과 유전손실의 온도의존성.

Fig. 12. Temperature dependency of capacitance & dielectric loss on the complex accelerating degradation sample.

한편, 유전손실 특성에서 40 ℃의 손실피크와 110 ℃ 부근의 약한 손실 피크가 나타나고 있으며, 160 ℃ 이후 손실이 급증하여 200 ℃를 넘어선 영역에 주손실 피크가 나타날 것으로 예상된다.

40 ℃ 부근의 손실피크는 인가 주파수가 저주파수에 해당하는 60Hz임을 고려할 때 가속열화시의 열충격에 의한 실리콘 함침수지와 폴리이미드 주절연물의 구조결함과 비교적 단위가 큰 측쇄에 의한 손실의 기어로 볼 수 있으며, 특히 복합열화시 내열한계인 250 ℃를 경계로 하는 열충격에 의한 초기의

구조결함과 측쇄의 절단이 “270℃-15일” 열화조건의 샘플에서 가장 크게 발생하였음을 알 수 있다. 110 ℃ 부근의 손실피크와 100 ℃ 이상 고온 영역에서의 유전손실은 가속열화 온도가 250 ℃를 초과할 때 절연물의 본격적인 구조결함이나 열분해에 의한 절연물의 거시적인 열화정도를 반영한 것으로 여겨진다. 그리고 200 ℃ 이후 고온영역의 주손실은 “250℃-50일” 열화 샘플이 가장 크게 나타날 것으로 예상되는데 이는 구조결함을 초래하는 한계온도를 넘는 경우에는 열화온도 보다는 열화기간의 장시간 지속에 의한 영향이 절연물의 전체적인 구조결함을 더욱 증가시키는 것으로 해석 할 수 있을 것이다[16].

4.4 부분방전특성

그림 13은 230℃-175일 열화샘플에 대한 열화주기별 부분방전 개시전압 특성을 나타낸 것이며, 그림 14는 10주기의 복합가속열화 이후 수명중점에서의 부분방전 특성을 조사하기 위하여 상온에서 측정된 부분방전 특성을 비교한 것이다.

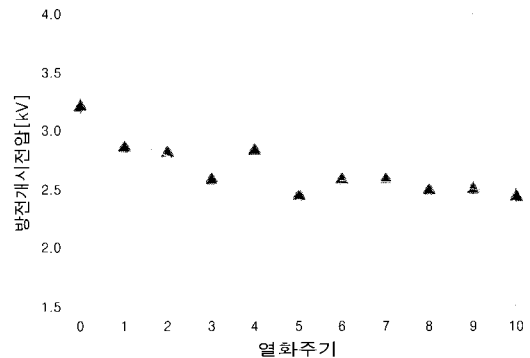


그림 13. 270℃-175일 열화 샘플의 주기별 PD 특성.
Fig. 13. Periodic PD properties of degradation sample during 270℃-175days.

우선 “230℃-175일” 열화샘플의 경우 열화 이전의 3.2 kV 방전개시전압이 열화주기가 진행됨에 따라 감소하여 20년 운전스트레스를 모의한 10주기 이후의 최저 방전개시전압은 2.5 kV 정도이고, “250℃-50일” 열화샘플은 2.34 kV, “270℃-15일” 샘플의 경우에는 2.2 kV로서 가장 낮은 방전개시전압을 나타냈고 있지만, 견인전동기의 상 피크전압 1.8 kV를 고려할 때 10주기 열화 이후에도 절연물의 구조적 건전성이 유지되고 있음을 알 수 있다.

그리고 인가전압 2.58 kV에서의 열화조건별 최대

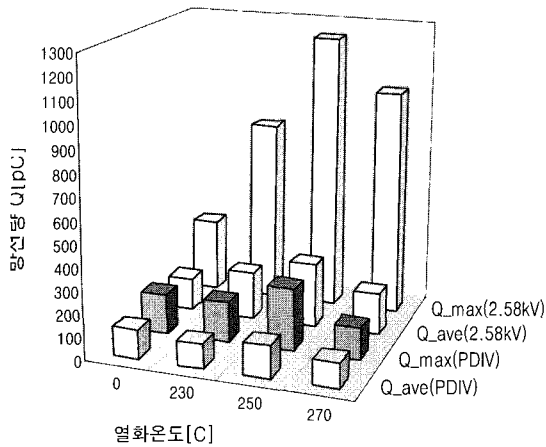


그림 14. 복합가속열화 샘플의 부분방전 특성비교.

Fig. 14. Comparison of PD properties on the complex accelerating degradation sample.

방전전하량을 비교해 보면 “250℃-50일” 열화샘플의 최대방전량은 1200 pC, “270℃-15일” 열화샘플은 1000 pC, 230℃-175일 열화조건은 800 pC으로 나타났다. “250℃-50일” 열화샘플의 경우 열화전 최대방전량 300pC 수준에 비해 열화주기의 진전에 따른 부분방전량의 증가가 가장 현저하게 나타났으며, 앞서 언급한 유전손실 특성의 결과 분석과 부합하는 가장 심각한 열화를 받았음을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 전기철도용 견인전동기의 고장관정 기준 확립과 운전 신뢰성 평가를 위해 C종 절연구조를 가진 고정자 형코일을 대상으로 전기철도의 20년 운전에 해당하는 복합스트레스를 10주기에 걸쳐 인가하는 복합가속열화시험을 개발하여 수명종점에서의 절연열화 상태진단 연구에 적용하였으며, 절연특성분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

유전특성 및 부분방전특성 분석에서 C종 절연시스템의 구조결함을 초래하는 한계온도는 250 ℃로서 한계온도를 초과하는 경우에는 열화기간의 영향이 전체적인 구조적인 열화나 절연특성 저하를 더욱 악화시키는 중요 요인으로 작용하므로 견인전동기의 과열을 초래하는 무리한 운전의 회피와 이상상태를 초래한 운전이력의 철저한 관리가 요망된다.

권선 절연시스템은 10주기의 복합가속열화 이후 수명종점에서도 정상적인 운전조건하의 견전성이 유지되고 있음을 유전특성과 부분방전특성 분석을 통

해 확인 할 수 있었지만, 현행 유지보수에 적용하는 1분치 절연저항시험만으로는 절연시스템의 열화상태를 알 수 없으며, 주변환경의 영향을 배제할 수 있는 성극지수(PI)의 평가와 더불어 분극전류의 성분분리에 의한 열화정도 평가가 이루어져야 한다.

끝으로, 본 연구에서 제시한 견인전동기 권선절연의 상태진단 시험결과를 향후 견인전동기 운전관리 및 유지보수 판정기준 수립을 위한 기초자료로 활용할 수 있는 D/B 구축이 시급하다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 기관고유사업연구(과제번호 PK00102F)로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] 건설교통부고시, “도시철도차량 표준사양”, 제 1998-53호, 1998.
- [2] 건설교통부고시, “도시철도차량의 성능시험에 관한 기준”, 제2000-126호, 2000.
- [3] Austine H. Bonnett, “Analysis of the impact of PWM inverter voltage waveforms on ac induction motors”, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 32, No. 2, p. 386, 1996.
- [4] Satoshi Ogasawara, “가변속 ac drive의 누설전류. 지진압. 축전압과 그 대책”, 日本電學論 D, 118권, 9호, p. 975, 1996.
- [5] 왕중배, “철도차량용 견인전동기의 절연설계 및 절연시스템 구성”, 한국전기전자재료학회 2001학계 학술대회 논문집, Vol. 2, p. 194, 2001.
- [6] 한국철도기술연구원, “추진제어장치연구개발(전동 AC견인전동기 표준설계)”, '99 건설교통부 도시철도차량 표준화·국산화 연구보고서, p. 78, 1999.
- [7] 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, p. 919, 1996.
- [8] 인버터써지 절연조사전문위원회, “인버터 써지의 절연시스템에 미치는 영향”, 日本電氣學會 技術報告, 第 739호, 1998.
- [9] 이준용, “복합열화에 의한 형권 고정자 권선의 절연신뢰성에 관한 연구”, 한국전기전자재료학회 2000학계 학술대회 논문집, p. 152, 2000.
- [10] IEEE Standard. 792-1987, “Trial-use recommended

practice for the evaluation of the impulse voltage capability of insulation system for AC electric machinery employing form-wound stator coils”.

- [11] NEMA Standard. MG 1-Part 31 (31.40.4.2)
- [12] IEEE Standard. 275-1981, "Recommended practice for thermal evaluation of insulation system for AC electric machinery employing form-wound preinsulated stator coils for machines rated 6,900V and below”.
- [13] 이병성, 김찬영, 한재홍, “배전용 폴리머에자의 현장열화 특성평가”, 전기전자재료학회논문지, Vol. 13, No. 10, p. 847, 2000.
- [14] 김탁용, 이덕진, 홍진웅, “흡수열화에 따른 Epoxy/SiO² 복합체의 전기적 특성 및 수명예측”, 전기전자재료학회논문지, Vol. 13, No. 9, p. 758, 2000.
- [15] R. Goffeaux and M. Krecke, "Dielectric test methods for rotating machine stator insulation inspection", IEEE Proc. p. 528, 1999.
- [16] 김기엽, 류부형, 강성화, 이칭, 임기조, “방사선 조사에 따른 저밀도 폴리에틸렌의 유전특성”, 전기전자재료학회논문지, Vol. 13, No. 11, p. 938, 2000.