

견인전동기 고정자 코일의 열화특성 연구

장동욱, 변윤섭, 왕종배, 박현준, 김길동, 한영재
한국철도기술연구원

Research of Degradation Properties on Stator Coil of Traction Motor

Dong-Uk Jang, Yeun-Sub Byun, Jong-Bae Wang, Hyun-June Park, Gil-Dong Kim, Young-Jae Han
Korea Railroad Research Institute

Abstract - In this paper, 200-class insulation system for form-wound stator coils is designed for AC traction driven with VVVF inverter. Model coils are made to embody all essential elements representing a winding insulation system and structure. Acceleration degradation for model coils is applied exposure to heat(235 °C). In order to investigate the condition of the coils and to determine their insulation reliability, high voltage test and the dielectric properties such as dielectric loss and capacitance are performed. Also, partial discharge measurement is investigated for internal defects.

1. 서 론

현재 전기철도에 사용되고 있는 견인전동기는 일반적으로 지하철 환경의 높은 습도, 고온 및 저압력 하에서 운행이 되고 있다. 이러한 환경에서는 부분방전 개시전압이 낮게 나타나고, VVVF인버터 구동에 의한 전압과 도현상도 또한 부분방전을 일으킬 수가 있다[1-2].

그리고 최근에는 IGBT와 같은 고속 스위칭 소자의 사용에 따라서 더 큰 스위칭 서지전압을 일으키고 있다. 이러한 환경에서 사용되고 있는 견인전동기는 사용 연수의 증가에 따라서 코일의 열화가 진전이 되어 절연이 악화 되어 결국에는 절연이 파괴되어 사고에 이르게 된다.[3-4].

본 논문에서는 열과 인버터 서지 전압의 코일 턴간 절연에 미치는 영향을 고려하기 위해서 열열화와 인버터 서지전압을 모의한 파형을 인가하여 실험을 실시하였고, 열화에 따른 절연에 대한 신뢰성을 평가하기 위해서 정전용량, $\tan \delta$, 부분방전을 측정하였다.

2. 본 론

2.1 시편제작

본 연구에 사용된 복합가속열화용 고정자 형코일 샘플의 형상은 내부의 턴간 절연을 평가하기 위해서 그림 1과 같은 형상으로 제작하였으며, 실제 견인전동기 제작시의 요소를 모두 반영하고 있다.

제작방법 및 절연구성은 표 1과 같으며, 폴리이미드(Kapton) 및 실리콘 수지를 주체로 한 C종(200 °C급) 절연구성과 진공함침(VPI) 처리를 통하여 높은 열 안정성, 진동 및 오염조건에서의 내력을 강화하여 인버터 구동에 대한 신뢰성을 확보한 절연구성을 가지고 있다.



그림 1. 시편형상

표 1. 견인전동기용 고정자 형코일의 C종(200°C) 절연구성

품 명	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, 형코일 샘플 제작	턴절연 시험용 인출선 처리	소선별 인출선 절연보강 처리
	모의철심을 가진 샘플코일 제작	동판슬롯구조의 모의철심 및 형코일 샘플제작
3. VPI 함침 처리	Silicone Resin 진공함침	함침 60°C-3hr 건조 200°C-16hr

2.2 실험방법

먼저 코일 턴간 시편은 열열화를 시키기 위해서 235 °C로 32일 동안 열화를 시켰다. 위의 온도는 IEC34-18-31의 200 °C급을 참고하여 선정하였다. 열화주기는 4, 8, 16, 32일로 선정을 하였으며, 한 주기가 끝날 때마다 모의 임펄스를 인가하였으며 모의 임펄스의 크기는 약 4.5 kV이다.

열화에 의한 코일 내부 턴간 절연 신뢰성을 평가하기 위해서 정전용량, $\tan \delta$, 부분방전을 측정하였다. 60 Hz의 고전압을 인가하면서 정전용량과 $\tan \delta$ 을 측정할 수 있는 TETTEX사의 Capacitance & dielectric loss measurement(type 2809)을 사용하였다. 인가 전압은 250 V씩 증가를 시켜 가면서 2000 V까지 측정을 하였다. 또한 부분방전계측기를 이용하여 부분방전 개시전압과 분포를 측정하였다. 부분방전 측정시, 전압은 개시전압에서 전압을 100 V씩 증가시켜 가면서 측

정하였고, 부분방전 계측은 5 pC이상의 크기를 갖는 것을 300주기 동안 측정된 데이터를 컴퓨터에 저장하여 통계적 처리를 실시하였다.

2.3 실험결과

2.3.1 유전특성

그림 2, 3은 각각 열화전과 후의 전압에 따른 정전용량과 $\tan \delta$ 변화를 나타내고 있으며, 값은 코일 하나에 3개의 턴간을 측정하여 평균하였다. 정전용량은 전압증가에 따라서 비례적으로 증가를 하고 있다. 정전용량측정결과 정전용량이 변화를 한 것은 열에 의해서 코일내부에 미소 보이드가 증가하거나, 내부절연물의 구조가 변화한 것으로 생각이 된다.

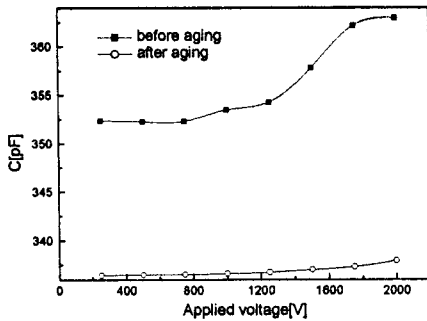


그림 2. 열화 전·후의 정전용량 변화

$\tan \delta$ 는 열화전에는 약 1000 V에서 급증을 하기 시작하였고, 열화후에는 약 800 V에서 급증을 하기 시작하였고, 증가율도 열화후가 더 심하게 나타나고 있다. 이것은 열열화에 의해서 턴간 절연으로 사용되고 있는 Kapton에 결함이 생기고 내부에 많은 미소 보이드가 발생을 했기 때문이다. 이러한 결함은 전계가 집중이 되고 상대적으로 절연내력이 낮은 절함부분에서 부분방전을 발생하게 되어, 부분방전에 의한 점진적인 열화에 의하여 절연특성이 상당히 악화되어 결국 절연파괴가 도달하게 된다.

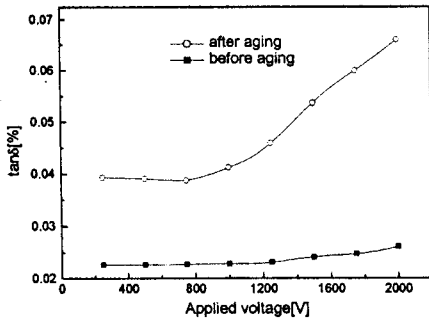
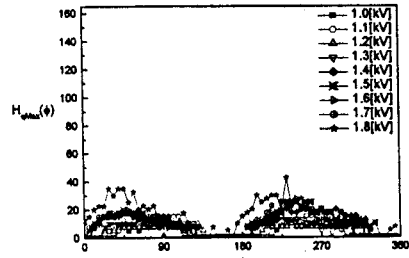


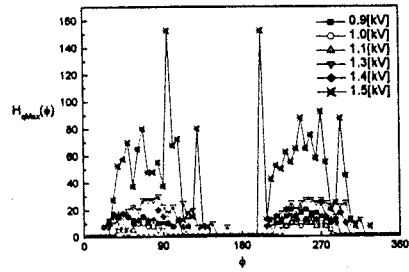
그림 3. 열화 전·후의 $\tan \delta$ 변화

2.3.2 부분방전특성

부분방전은 열화전과 후의 개시전압을 비교해 보면 $\tan \delta$ 가 증가하기 시작한 부분과 거의 일치하는 값을 나타내었다. 그림 4는 열화전후의 최대방전전하량의 변화를 나타내고 있으며, 그림과 같이 최대방전 전하량이 열화후에 상당히 증가가 된 것을 확인할 수가 있었고, 전압의 증가에 따라서도 증가를 하고 있다.



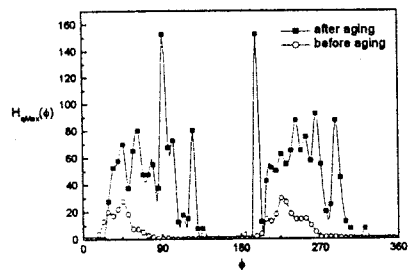
(a) 열화전



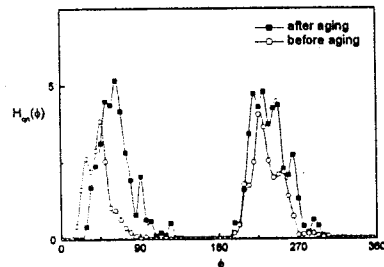
(b) 열화후

그림 4. 전압에 따른 $H_{qMax}(\psi)$ 분포

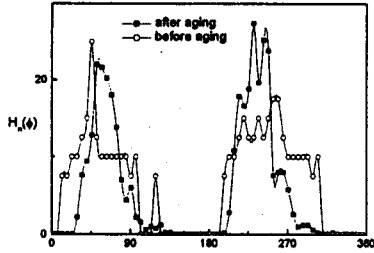
그림 5(a)~(d)는 열화 전·후의 부분방전의 통계적 분포를 나타내고 있다. 그림에서도 알 수 있듯이 열화후에 방전량이나, 발생율이 더 많게 나타나고 있다. 그림 5(d)를 보면 열화전에는 작은 크기의 부분방전이 많이 발생을 하다가, 열화후에는 부분방전의 크기가 큰 것이 더 많이 발생을 하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 것은 열열화에 의해서 내부의 미소 보이드의 크기가 커지거나 더 많이 생긴 것으로 앞의 $\tan \delta$ 측정결과와 부합하는 결과이다. 그림 6은 인가전압 1.5 kV에서 3차원 분포(ψ -q-n)를 나타내며, 넓은 위상각의 범위에서 부분방전이 분포하고 있는 것을 볼 수가 있다.



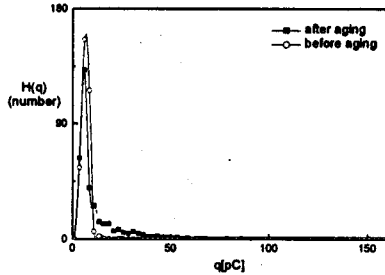
(a) $H_{qMax}(\psi)$ 분포



(b) $H_{qn}(\psi)$ 분포

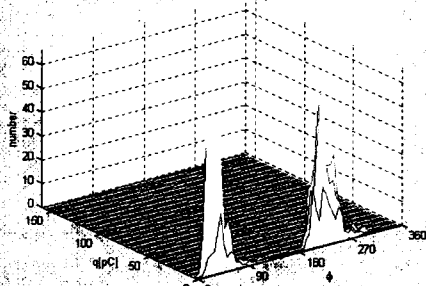


(c) $H_n(\phi)$ 분포

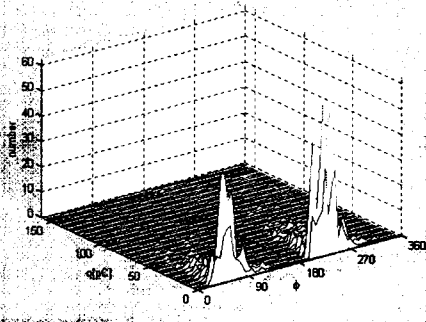


(d) $H_q(n)$ 분포

그림 5. 부분방전 통계적 분포(인가전압 1.5 kV)



(a) 열화전



(b) 열화후

그림 6. 부분방전 3차원분포(인가전압 1.5 kV)

3. 결 론

건인전동기의 고정자 코일로 사용되고 있는 것을 실제
작하여 열열화 시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻

었다.

1. 정전용량의 측정결과 전압에 따라서 증가를 하는 경향을 나타내었으며, 열화 전·후에 값의 변화는 절연물내부의 공극의 증가에 의한 것으로 생각된다.
2. $\tan \delta$ 값은 열화후에 증가를 하였으며, 급증하는 시점은 부분방전 개시전압과 일치하였다. 또한 열화후에 더 크게 증가를 하였다.
3. 부분방전의 측정결과 방전개시전압은 큰 차이를 나타내지는 않았지만, 방전분포를 보면 열화후에 더 최대방전량이 더 크게 발생을 하였고, 발생을 또한 증가를 하였다.

향후 VVVF인버터 서지 전압과 열을 동시에 고려한 가속열화시험을 실시하여 추가적인 연구가 더 수행되어야 할 것으로 생각된다.

[참 고 문 헌]

- [1] C.Petrarca et al., "Investigation on Performance of Insulation Materials for Inverter-fed Traction Motors", Proceedings of the 1998 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena - Volume 2, pp.564-567, 1998
- [2] R.Goffeaux et al., "Dielectric Test Methods for Rotating Machine Stator Insulation Inspection", Proceedings of the 1998 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena - Volume 2, pp.528-533, 1998
- [3] Jong-Bae Wang et al., "Degradation Evaluation of Insulation System for Form-Wound Stator Coils for Traction Motors", Proceedings of the International Conference on Electrical Engineering 1999 - Volume 2, pp. 243-246, 1999
- [4] 한국철도기술연구원, "전동차 전기추진장치의 고장예방 및 유지관리자동화 시스템 기술개발 - 1차년도 보고서", 2000