

견인전동기 고정자 코일의 전기적 열화특성

Properties of Electrical Performance on Stator Coil of Traction Motor by Accelerated Test

박현준* 장동욱** 김길동***
Park, Hyun-June Jang, Dong-Uk Kim, Gil-Dong

ABSTRACT

Aging and failure of motor insulation depend on the stresses imposed on it. The insulation life time depends on the severity of the stresses. The electrical aging by transient surge is very important to traction motor in EMU(electric multiple unit). This paper presents the insulation characteristics of stator coil by transient surge from inverter. There are several nondestructive tests available for checking the condition of motor insulation, the probable extent of aging, and the rate of which aging is taking place. So the insulation characteristics of stator coil were each analyzed by measurement of leakage current, dielectric loss($\tan \delta$), capacitance, polarization index(PI) and partial discharge. The method of diagnosis is able to analyze the aging condition and predict the life of the traction motor in EMU.

1. 서론

전동차의 고속화·고성능화에 따라 전동차용 견인전동기에 과도 서지, 국부과열로 인한 절연 안정성 문제가 대두되고 있다. 견인전동기는 체적에 비해 큰 토크를 발생시키고 넓은 범위의 속도제어가 가능하며 기계적 충격에 강한 장점을 가지고 있지만, 반복적인 동작에 의한 과부하나 급변하는 전압에 의한 절연파괴가 전동기 고장의 커다란 원인을 차지한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 인버터를 사용하는 견인전동기에서의 과전압 서지에 의한 절연재료의 열화 및 이상상태에 미치는 영향분석과 이에 대한 진단연구가 필요하다.

본 연구에서는 VVVF 인버터로 구동되는 정격출력 200[kW]급 전동차용 견인전동기 C종(200 class)절연구성의 고정자 코일을 실제 생산조건과 동일하게 제작하였다. 그리고 견인전동기 권선의 절연상태에 영향을 주는 전기적 스트레스의 반복인가에 따른 전기적 특성 저하를 파악하기 위해 전동기 권선에 인버터 과전압 서지를 반복적으로 인가하는 상태 진단 실험을 진행하였다. 따라서 전동차용 견인전동기 수명평가를 위한 가속열화에 대한 체계적인 기준자료를 구축함으로써 안정성 확보와 신뢰성 증가를 도모하였다.

* 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원
** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원
*** 한국철도기술연구원 주임연구원, 비회원

2. 시편 및 실험방법

2.1 시편

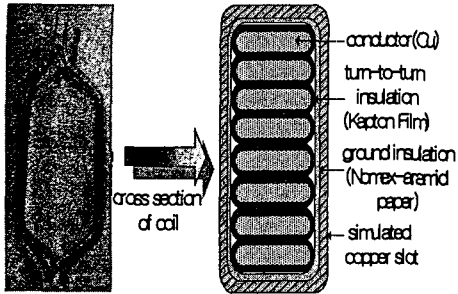


그림 1. 견인전동기 고정자 코일과 단면도

품명	사양 및 규격	
200 class 절연자재	소선절연물	Kapton코팅처리
	대지절연물	Kapton Film
	주절연물	Nomex-aramid paper
	슬롯왁시	Epoxy-glass tape
	모의철심용 동판	적층판
절연처리및고정자 코일 샘플제작	턴절연 시험용 인출선 처리	소선별 인출선 절연보강 처리
	모의철심을 가진 샘플코일 제작	동판슬롯구조의 코일 샘플제작
	모의철심 및 고정자	모의철심 및 고정자
VPI 합침처리	Silicone Resin	합침 60°C-3hr
	진공합침	건조 200°C-16hr

표 1. 견인전동기 고정자 코일의 C종(200class) 절연구성

2.2 실험방법

그림 2는 dc link 전압 $V_{dc}=1,500$ V를 인가하여 PWM 인버터로 구동되는 견인전동기 단자에서 측정된 선간 전압 파형으로서, 피크전압 $V_m=2,700$ V이고 상승시간 $t_r=0.7 \mu s$ 정도의 전형적인 IGBT 구동시의 과도전압 특성을 나타내고 있다. 전기적 열화의 전압은 선간 피크전압을 상 피크전압으로 계산하면 $V_{pm}=1,800$ V가 되므로, 인가전압을 1.8 kV로 선정하였다.

견인전동기 고정자 코일에 직접 인버터 전압을 인가하기 위해 그림 3과 같은 모의 VVVF 인버터 서지전압 발생장치를 구성하였다. 이 모의 장치는 가변전압조정기를 이용하여 입력전압을 조절할 수 있으며, 다이오드 삼상 정류기를 통하여 dc 전압출력하고, 이 출력이 IGBT 스위칭 소자를 이용한 단상 인버터 입력으로 사용된다. 인버터에서 출력된 구형파는 고주파 변압기에서 승압되며, 변압기의 승압비는 1:30으로 최대 3,000 V까지 전압인가 실험이 가능하다.

그림 4는 모의 VVVF 인버터 서지전압 발생장치에서 측정된 전압을 나타내고 있다. 실험은 주파수 2 kHz, 전압 1.8 kVp-p를 20시간을 1주기로 설정하여 총 5주기 (100 시간) 동안 고정자 코일에 인가하였다. 그리고 각 주기마다 서지전압에 대한 고정자 코일의 절연특성 변화를 측정하였다.

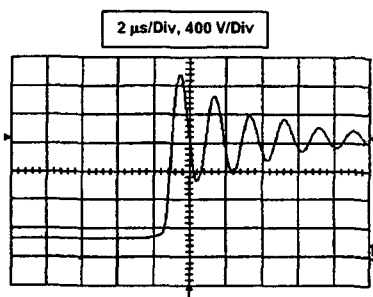


그림 2. PWM 구동 견인전동기의 단자간 과전압 (1,500Vdc 인가)

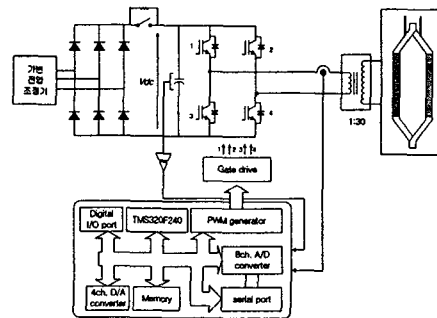


그림 3. 모의 VVVF 인버터 서지전압 발생장치

누설전류 및 전압인가 10분 후 전류값과 1분 후 전류값을 비교한 절연저항비인 성극지수를 측정하기 위해 Electrometer (Keithley model 6517A) 와 Recorder를 이용하여 직류 1000 V를 코일 동선과 대지간에 12분간 인가하여 전류변화를 측정 및 기록하였다. 또한 고정자 코일의 결함에 의한 평가를 실시 할 수 있는 정전용량과 유전손실은 Tettex사 Capacitance & Dielectric loss 측정장치 (Type 2809) 를 사용하여 각 주기마다 60 Hz의 정현파 전압을 400~1200 V 까지 200 V씩 상승시켜 측정하였다. 그림 5는 정전용량과 유전손실의 측정을 위한 장치 구성도 이다.

유전특성 측정 후 절연물중의 보이드 또는 절연물 표면에 발생하여 절연물 열화에 영향을 주는 부분방전 측정 실험을 위해 Robinson사의 PD detector (model 803.1) 및 분석시스템 (CDA-3) 을 이용하여 부분방전 개시전압과 소멸전압, 방전전하량 크기를 분석하였다. 그리고 실험 전 모든 고정자 코일에는 습기에 의해 나타날 수 있는 유전손실 증가와 절연내력의 저하에 의한 절연특성의 측정 오차 범위를 줄이기 위해 미리 오븐에서 습기제거를 위한 건조 작업을 수행하였으며, 측정온도는 25 °C로 일정하게 하여 측정하였다.

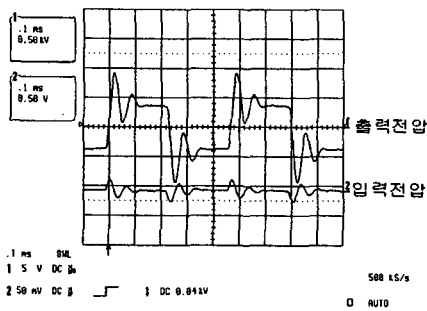


그림 4. 모의 VVVF 인버터 서지 전압 파형

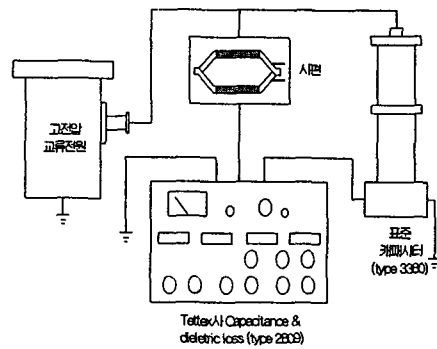


그림 5. 정전용량 및 유전손실 측정설비 구성도

3. 실험결과 및 분석

급준 과전압 서지에 의한 고정자 코일의 신뢰성 평가를 위한 실험 결과를 다음과 같이 얻을 수 있었다. 그림 6은 인버터 서지 전압인가 후 직류 1000 Vdc를 코일에 12분간 인가하여 시간에 따른 각 주기의 누설전류 변화 특성을 나타낸 것이다. 실험 전 누설전류치와 5주기 후의 누설전류 특성은 거의 일정하고 큰 변화가 없어 안정적인 절연 특성을 보인다.

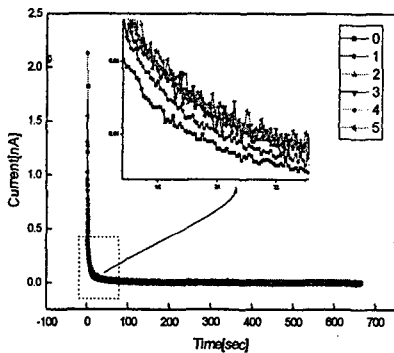


그림 6. 시간에 따른 각 주기의 누설전류 특성

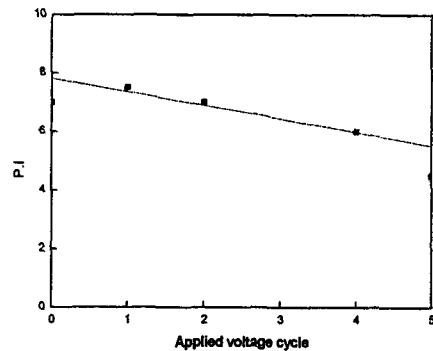
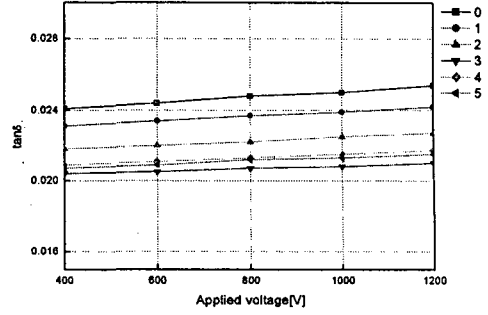
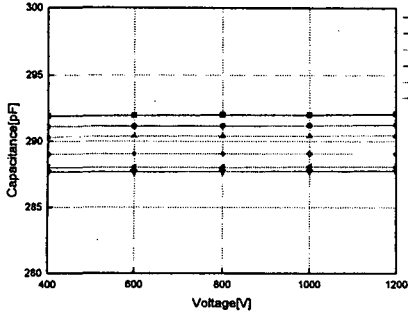


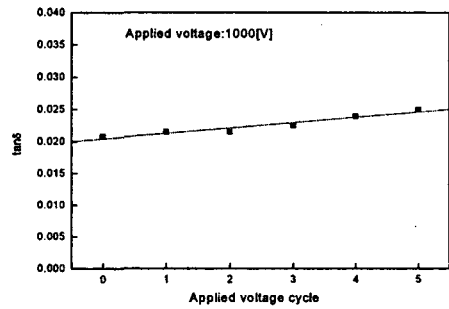
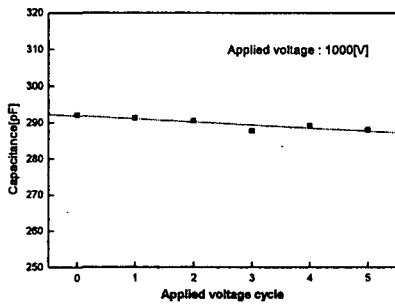
그림 7. 인가전압 주기에 따른 성극지수 특성



(a) 측정전압에 따른 각 주기의 정전용량 특성

(b) 측정전압에 따른 각 주기의 $\tan \delta$ 특성

그림 8. 측정전압에 따른 각 주기의 유전특성



(a) 인가전압 주기에 따른 정전용량 특성

(b) 인가전압 주기에 따른 $\tan \delta$ 특성

그림 9. 인가전압 주기에 따른 유전특성

보이드의 경우는 유전율이 낮기 때문에 정전용량이 감소하고, 유전손실의 경우는 부분방전 개시전압인 1 kV에서 측정을 하였기 때문에 보이드에서의 부분방전에 의해서 증가하게 된다.

그림 10은 주기에 따른 부분방전 특성을 보이고 있으며 실험주기가 증가할수록 개시전압은 감소하고, 그에 따라 소멸전압도 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 계속적인 전압인가로 절연물의 열적, 기계적 변형 등에 의한 전계의 불평등 심화 및 보이드 내에서의 부분방전에 의한 절연열화 등에 의하여 절연성능이 약화되기 때문이다.

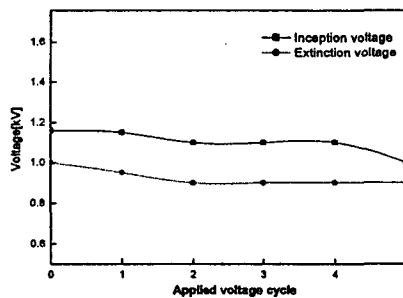


그림 10. 인가전압 주기에 따른 부분방전 특성

4. 결 론

전동차용 견인전동기에서 과도서지에 의한 절연열화 진전을 검토하기 위하여 누설전류, 유전손실($\tan \delta$), 정전용량, 성극지수, 부분방전 등의 방법을 사용하여 측정하였다. 과도서지에 의한 절연열화를 검토하기 위해서 모의 서지전압 발생장치를 구성하였으며, 견인전동기에 사용되는 고정자 코일을 실제 생산조건과 동일하게 제작하여 시험을 실시하였다. 고정자 코일에 대한 서지전압 열화시험결과를 볼 때, 누설전류 특성은 거의 일정하고 큰 변화가 없어 안정적인 절연특성을 보였으며, 성극지수도 양호한 절연상태의 범위내에서 크게 변화하지 않았다. 유전손실과 정전용량의 경우, 실험진행에 따라서 정전용량은 감소하며, 유전손실은 증가하는 경향을 보여 주고 있으나 변화량이 적으므로 절연상태에 큰 변화가 일어나지 않았다고 볼 수 있으며, 부분방전도 서지시험결과 방전개시 전압이 감소를 하고 있으나 큰 변화는 없었다. 본 연구에서 수행한 실험은 실험실 모델로써, 견인전동기 수명평가를 위한 가속열화 중에서 서지전압에 의한 체계적인 기준근거 구축을 위한 연구로써 의미가 있다고 할 수 있으며, 향후 여러 가지 변화를 비교해 보는 연구와 완제품 상태에서의 연구를 지속적으로 수행할 예정이다.

참 고 문 헌

1. I.M Culbert, H. Dhirani, and G.C. Stone, Handbook to assess the Insulation Condition of Large Rotating Machines, EPRI, EL-5036, Vol. 16, pp. 2-1~2-5, 1989.
2. R. Min, J.P. Nherney, R. Backam, and R. Rutherford, "Analysis of In-Service Aged Stator Bars", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol 10, No. 4, pp. 645~652, 1995.
3. 日本電氣學會, 전기학회기술보고 제739호 - 인버타서지의絶緣システムの影響, pp. 21~63, 1999.
4. C. Petrarca, L. Egiziano, V. Tucci, and M. Vtelli, "Investigation on Performances of Insulation Materials for Inverter-FED Traction Motors", Proceedings of the 1998 Annual Report CEIDP-Vol. 2, pp. 564~567, 1998.
5. 한국전기안전공사, 전기적 검출에 의한 고압 유도 전동기 무정전 진단기법 연구, pp. 137~190, 2001.
6. J.E. Timperley and J.R. Michalec, "Estimating the Remaining Service Life of Asphalt-Mica Stator Insulation", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 9, No. 4, pp. 686 ~692, Dec. 1994.
7. R. Goffeaux, M. Krecke, B. Comte, M. Cottet, and B. Fruth, "Dielectric Test Methods for Rotating Machine Stator Insulation Inspection", Proceedings of the 1998 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena - Vol. 2, pp. 528~533, 1998.
8. K. Bauer et al., "High Voltage Motor Insulation for High Power Adjustable Speed Drives Fed by IGBT-Converter", The 8th BEAMA International Electrical Insulation Conference, pp. 257~263, 1998.
9. IEC 60034-18-31, "Test procedures for form-wound winding - Thermal evaluation and classification of insulation systems used in machines"
10. IEEE Std. 522-1992, "Guide for testing turn-to-turn insulation on form-wound stator coils for AC rotating machines"
11. 박현준, "추진제어장치연구개발(전동차 AC견인전동기 표준설계)", 건설교통부 도시철도차량 표준화·국산화 연구개발보고서, 한국철도기술연구원, 1999. 12.
12. 박현준, "철도시스템 성능향상 핵심기술개발-전기분야", 철도시스템 선진화 기술연구사업 연구개발보고서, 한국철도기술연구원, 2002
13. 박현준, "전동차 AC 견인전동기의 가속열화에 관한 연구", 대한전기학회 2001 하계학술대회 논문집, pp1257-1259, 2001
14. 박현준, "차량진단 자동화시스템 분야", 한국철도기술연구원 철도시스템 기반기술연구 보고서, pp. 97-115, 2001