

인버터 전원에 의한 견인전동기 고정자 코일의 절연특성 변화

장동욱, 박현준, 이길현, 최종선*, 김정수*
한국철도기술연구원, *충의대학교

Change of Insulation Properties of Stator Coil fed by Inverter Source on Traction Motor

Dong-Uk Jang, Hyun-June Park, Gil-Hun Lee, Jong-Sun Choi, Jung-Soo Lee
KRRI, *Hongik University

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. 서 론

오늘날 철도 산업은 다른 교통수단에 비하여 대량 수송성, 정시성, 저공해성, 꽤적성의 장점을 가지고 있다. 하지만 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 가장 큰 원인을 차지한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 인버터를 사용하는 견인전동기에서의 과전압 서지에 의한 절연재료의 열화 및 이상상태에 미치는 영향 분석과 이에 대한 진단연구가 필요하다^[1-5].

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 전단 실험을 진행하였다. 따라서 전동차용 견인전동기 수명평가를 위한 가속열화에 대한 체계적인 기준자료를 구축함으로써 안정성 확보와 신뢰성 증가를 도모하였다^[6, 7].

2. 본 론

2.1 시편

인버터 구동 견인전동기에는 스위칭 소자가 스위칭을 할 때 스위칭 서지를 발생하며, 이 서지전압은 케이블과 견인전동기의 임피던스 차이에 의해서 반사파 과전압이

증발된다. 상승시간이 $1\mu s$ 이하로 빠른 경우 견인전동기 권선에 인가되며, 이러한 과전압은 고정자 코일의 초입부에 집중되어 부분방전에 의한 절연열화를 유발할 수 있다. 이러한 부분방전은 고정자 코일의 내부 절연을 약화시켜 결국에는 절연파괴에 이르게 하는 원인이 되므로 서지전압에 대한 절연안정성을 평가하는 것은 중요하다고 할 수 있다.

시편은 견인전동기에 사용되는 고정자 코일 시편을 사용하였으며, 절연구성은 표 1과 같은 절연구성을 가지고 있다. 폴리이미드(kapton) 및 실리콘 수지를 주체로 한 C종(200°C) 절연구성과 진공합침(VPI)처리를 통하여 높은 열 안정성, 진동 및 오염조건에서의 내력을 강화하여 절연에 대한 신뢰성을 확보하였다. 그럼 1은 시험에 사용된 견인전동기 고정자 코일과 내부 단면 모형도이다.

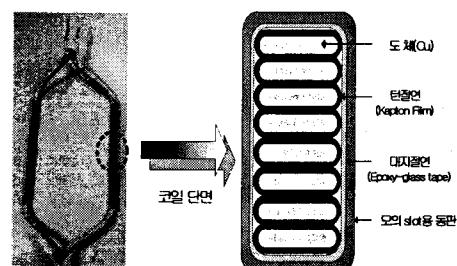


그림 1. 견인전동기 고정자 코일과 단면도

표 1. 견인전동기 고정자 코일의 C종(200class) 절연구성

품 명	사양 및 규격	
200 class 절연자 재	소선절연물	Kapton 코팅처리
	대지절연물	Kapton Film Nomex-aramid paper
	주절연물	Silicone resin
	슬롯净资产	Epoxy-glass tape 적층판
	모의 철심 용 동판	두께: 1.5 mm
절연처 리 및 고 정자 코일 샘플 제 작	단절연 시험용 인출선 처리	소선별 인출선 절연보강 처리
	모의 철심을 가진 샘플 코일 제작	동판슬롯구조의 모의 철심 및 고정자 코일 샘플제작
VPI 합침처 리	Silicone Resin 진공합침	합침 60-3hr 건조 200-16hr

2.2 실험방법

그림 2는 dc link 전압 $V_{dc}=1.500$ V를 인가하여 PWM 인버터로 구동되는 견인전동기 단자에서 측정한 선간전압 파형으로서, 피크전압 $V_m=2.700$ V이고 상승시간 $tr=0.7 \mu s$ 정도의 전형적인 IGBT 구동시의 과도전압 특성을 나타내고 있다. 전기적 열화의 전압은 선간피크전압을 상 피크전압으로 계산하면 $V_{pm}=1.800$ V가 되므로, 인가전압을 1.8 kV로 설정하였다.

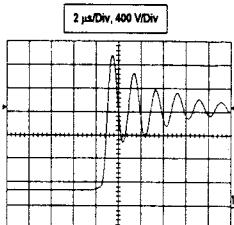


그림 2. PWM 구동 견인전동기의 단자간 과전압
파형(1,500Vdc 인가)

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 전압출력을 하고, 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.

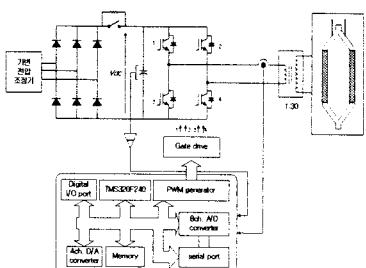


그림 3. 모의 VVVF 인버터 서지전압 발생장치

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

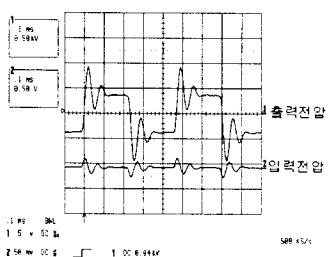


그림 4. 모의 VVVF 인버터 서지 전압 파형

누설전류 및 전압인가 10분 후 전류값과 1분 후 전류값을 비교한 절연저항비인 성극지수를 측정하기 위해 Electrometer(Keithley model 6517A)와 Recorder

를 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. 그럼 5는 정전용량과 유전손실의 측정을 위한 장치 구성도이다.

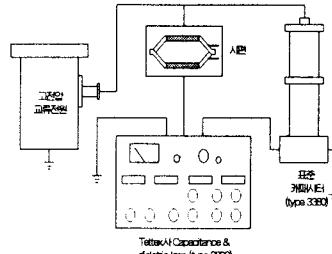


그림 5. 정전용량 및 유전손실 측정설비 구성도

유전특성 측정 후 절연물중의 보이드 또는 절연물 표면에 발생하여 절연물 열화에 영향을 주는 부분방전 측정실험을 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 전조 작업이 수행하였으며, 측정온도는 25 °C로 일정하게 하여 측정하였다.

2.3 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 V_{dc}를 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.

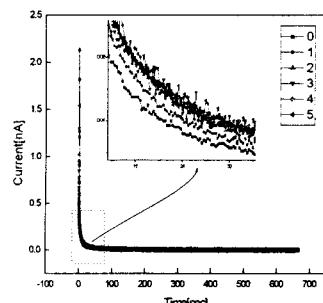


그림 6. 시간에 따른 각 주기의 누설전류 특성

그림 7은 인가전압 주기에 따른 성극지수 변화를 보이고 있으며, 열화 주기가 증가하면서 성극지수가 안정적인 범위내에서 크게 변화하지 않았다. 즉, 일반적으로 10분 후 전류값과 1분 후 전류값을 비교한 절연저항비가 2.0 이상이면 양호한 절연상태를 보여주는데 5주기까지의 실험결과 값이 4.5~7 사이의 성극지수값을 보여주고 있어 실험조건에서의 고정자 코일은 모의 인버터 전압에 대해 안정하다는 것을 알 수 있었다.

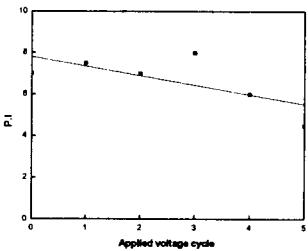


그림 7. 인가전압 주기에 따른 성극지수 특성

그림 8은 측정전압 변화에 따라 각주기의 유전특성을 나타낸 것으로 인버터 서지 전압인가 후에 주기마다 정전용량과 유전손실 측정을 위해 각각 400, 600, 800, 1000, 1200 V를 인가하여 측정하였다. 그림 8 (a), (b)에서 살펴보면 인가전압에 따라서 정전용량은 거의 일정하게 나타났고, 유전손실은 전압에 대해서 증가하는 경향을 나타내었다. 유전손실이 증가하는 것은 전압이 증가함에 따라서 고정자 코일의 내부에서 부분방전이 발생하여 나타난 결과로 볼 수 있다.

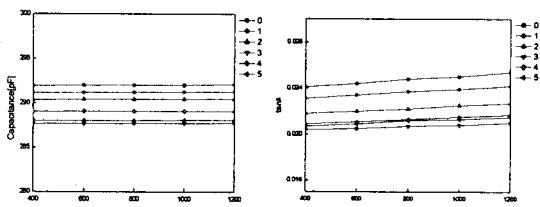


그림 8. 측정전압에 따른 각 주기의 유전특성

그림 9는 인가전압 주기가 증가함에 따른 유전특성을 나타낸 결과로 측정전압 1 kV일 때의 유전손실과 정전용량 값을 나타낸 것이다. 실험 주기가 늘어갈수록 정전용량은 감소하고 유전손실은 증가하는 현상을 보여주고 있다. 이러한 원인은 모의 인버터 서지전압의 가속열화에 의해서 절연물 내부에 보이드와 같은 결함이 발생하여 생긴 결과로 볼 수 있다. 보이드의 경우는 유전율이 낮기 때문에 정전용량이 감소하고, 유전손실의 경우는 부분방전 개시전압인 1 kV에서 측정을 하였기 때문에 보이드에서의 부분방전에 의해서 증가하게 된다.

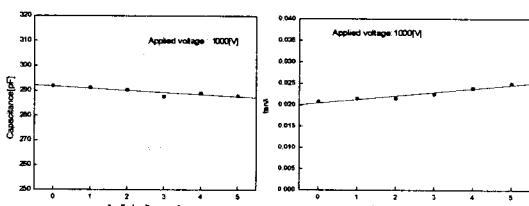


그림 9. 인가전압 주기에 따른 유전특성

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 때문이 다.

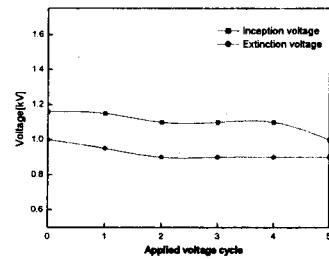


그림 10. 인가전압 주기에 따른 부분방전 특성

3. 결 론

본 논문에서는 전동차용 견인전동기에서 과도서지에 의한 절연열화 진전을 검토하기 위하여 누설전류, 유전손실($\tan \delta$), 정전용량, 성극지수, 부분방전 등의 방법을 사용하여 측정하였다. 과도서지에 의한 절연열화를 검토하기 위해서 모의서지전압 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. 즉, 본 논문의 실험결과 각 절연진단시험 항목별로 일부 변화경향을 보이고 있으나, 절연열화의 큰 변화나 절연파괴와 관련된 변화라고 볼 수 없었다. 이번에 실시한 실험은 실험설 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] 日本電氣學會, 전기학회기술보고 제 739 호 - インバータ サージの絶縁システムの影響, pp. 21-63, 1999
- [2] 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 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena - Volume 2, pp. 564-567, 1998
- [3] 한국전기안전공사, 전기적 검출에 의한 고압 유휴 전동기 무정전 전단기법 연구, pp. 137-190, 2001
- [4] 한국철도기술연구원, 전동차 전기주전장치의 고장예방 및 유지관리 자동화시스템 기술개발, pp. 163-200, 2000
- [5] 한국철도기술연구원, 차량진단 자동화시스템 분야, pp. 97-115, 2001
- [6] IEC Std. IEC 60034-18-31, "Test procedures for form-wound winding - Thermal evaluation and classification of insulation systems used in machines"
- [7] IEEE Std. 522-1992, "Guide for testing turn-to-turn insulation on form-wound stator coils for AC rotating machines"