

인버터 서지에 의한 견인전동기 고정자 권선의 전기적 특성 변화

박현준*, 장동욱, 최남호, 최종선**, 김정수**
한국철도기술연구원, 홍익대학교**

Properties of Electrical Performance by Inverter Surge on Stator Coil of Traction Motor

Hyun-June Park, Dong-Uk Jang, Nam-Ho Choi, Jong-Sun Choi, Jung-Soo Kim
Korea Railroad Research Institute, Hong-Ik Univ.**

Abstract - The aging of the insulation reduces the electrical and mechanical strength of the insulation. At same point, a voltage surge or mechanical shock from a traction motor start will fracture or break down the insulation. To achieve the expected life usually requires extensive laboratory evaluation of the insulation systems and the use of accelerated aging tests. There are several nondestructive test 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 dielectric loss($\tan\delta$), capacitance and partial discharge. The method of diagnosis is able to analyze the aging condition and predict the life of the traction motor.

1. 서 론

철도차량의 고속화, 고성능화 및 신뢰성 보장의 추구에 따라 철도차량의 경량화와 장수명화를 위한 노력과 함께 인버터 구동 전기추진방식의 도입과 반도체를 활용한 기기류의 전자화·무점접화, 장치의 일체화 등에 의해 차량 부품의 교체시기가 길어지고 손이 거의 가지 않는 차량시스템의 개발과 도입이 더욱 가속화되고 있는 실정이다. 철도차량의 유지보수도 기술발전에 대응하여 종래의 가동시간기준의 overhaul식 시간계획 보전에서 설비진단기술을 이용하여 설비의 상태를 정량적으로 파악함으로써 최적의 보전을 실시하고자 하는 상태감시 예방보전형으로 전환되는 추세이며, 특히 분해하지 않은 상태에서 기구나 장치의 열화 및 이상상태를 진단하는 비분해 검사와 차량 운행중의 이상검지에 의해 돌발고장을 예방하는 고장감시 기술에 대한 연구가 최근에 주목 받으면서 철도운행의 안전성 확보와 차량보전의 효율화를 도모하고 있다. 현재 전기철도에 사용되고 있는 견인전동기는 일반적으로 저하철 환경의 높은 습도, 고온 및 기계적 충격 등 열악한 환경 하에서 운행이 되고 있다. 이러한 환경에서는 부분방전 개시전압이 낮게 나타나고, VVVF(variable voltage variable frequency)인버터 구동에 의한 전압과도현상 또한 부분방전을 일으킬 수가 있다.

그리고 최근에는 IGBT (insulated gate bipolar transistor)와 같은 고속 스위칭 소자의 사용에 따라서 더 큰 스위칭 서지전압이 발생하고 있다. 견인전동기는 사용 년수의 증가에 따라서 코일의 열화가 진전이 되어 절연이 악화되어 결국에는 절연이 파괴되어 사고에 이르게 된다. 본 논문에서는 고정자 코일의 절연진단을 실시하기 위해서 열열화를 실시한 후 코일의 턴간에 모의 인버터 서지전압을 인가하여 전기적 가속열화를 실시하였

다.

표 1. 국내 노선별 전동차 검수규격 비교

	일상검수	월상검수			중간검수			전반검수					
		2월	3월	1개월	2개월	3개월	6개월	18개월	2년	3년	3년	4년	6년
KNR 저항 제어 차량	적용여부	●		●		●	●				●		
	표준사업 키로(km)	500		1만 5천		4만 5천	9만	27 만				54 만	
KNR 인버 터 제어 차량	적용여부	●		●		●			●			●	
	표준사업 키로(km)	1,000			3만		9만		36 만			72 만	
서울시 지하 철 공사	적용여부		●		●				●			●	
	표준사업 키로(km)		-		3만				30 만			60 만	
서울시 도시 철도 공사	적용여부		●			●				●		●	
	표준사업 키로(km)		-			4만				40 만		80 만	
부산 지하철 공사	적용여부	●				●				●		●	
	표준사업 키로(km)	1,000				3만			30 만			60 만	
일본	적용여부		●						●			●	
	표준사업 키로(km)		2,000			3만				40 만		80 만	

전기적 가속열화에 의한 절연진단 시험으로 정전용량, 유전손실, 부분방전을 측정하였으며, 부분방전은 전기적 가속열화에 의해서 변화하는 부분방전 통계량을 통하여 열화전후의 변화를 검토하였다.

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.

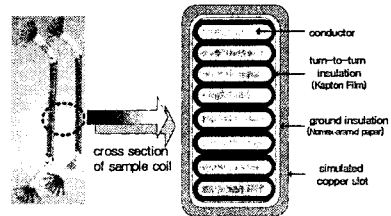


그림 1. 시편형상

절연구성은 폴리이미드(Kapton) 및 실리콘 수지를 주재료로 한 C종(200 ℃급) 절연구성과 진공함침(VPI) 처리를 통하여 높은 열 안정성, 진동 및 오염조건에서의 내력을 강화하여 인버터 구동에 대한 신뢰성을 확보한

절연구성을 가지고 있다.

2.2 실험방법

전인전동기 고정자 코일에 직접 인버터 전압을 인가하기 위해 모의 VVVF 인버터 서지전압 발생장치를 그림 2와 같이 구성하였다. 이 모의 장치는 가변전압조정기를 이용하여 입력전압을 조절할 수 있으며, 다이오드 삼상 정류기를 통하여 DC전압을출력하고, 이 출력이 IGBT 스위칭 소자를 이용한 단상 인버터 입력으로 사용된다. 인버터에서 출력된 구형파는 고주파 변압기에서 승압되며, 변압기의 승압비는 1:30으로 최대 3000 V 까지 전압인가 실험이 가능하다.

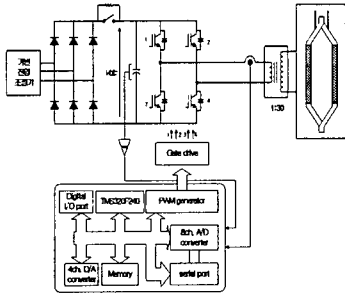


그림 2. 모의 VVVF 인버터 서지전압 발생장치.

모의 인버터 서지전압 발생장치에서 발생하는 서지전압 파형을 그림 3에 나타내었다.

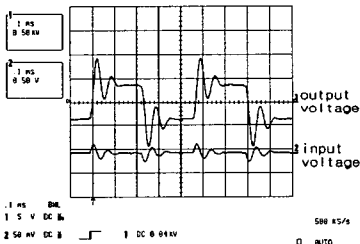


그림 3. 모의 VVVF 인버터 서지 전압 파형.

따라서 가속열화실험시 인가한 모의 인버터 서지 전압은 주파수 2 kHz, 전압 1.800 kV를 100시간 동안 고정자 코일에 인가하였다. 고정자 코일의 결함에 의한 평가를 실시 할 수 있는 정전용량과 유전손실은 Tettex사 Capacitance & Dielectric loss 측정장치(Type 2809)를 사용하여 열화 전후에 대해서 60 Hz의 정현파 전압을 250 V에서 2,000 V까지 250 V씩 증가시켜 측정하였다.

2.3 실험결과

2.3.1 정전용량 및 유전손실

그림 4, 5는 각각 열화전과 후의 전압에 따른 정전용량과 $\tan\delta$ 변화를 나타내고 있으며, 값은 코일 하나에 3개의 단간을 측정하여 평균하였다. 정전용량은 전압증가에 따라서 비례적으로 증가를 하고 있다. 정전용량측정 결과 정전용량이 변화를 한 것은 열 및 전기적 스트레스로 인하여 결함이 생겨 변화한 것으로 판단된다.

$\tan\delta$ 는 열화전에는 약 1,000 V에서 증가하기 시작하였고, 열화후에는 약 800 V에서 증가하기 시작하였으며, 증가율도 열화후가 더 심하게 나타나고 있다. 이것은 열열화에 의해서 단간 절연으로 사용되고 있는 Kapton에 결함이 생기고 내부에 많은 미소 보이드가 발생을 했기 때문으로 추정된다. 이러한 결함은 전계가

집중이 되고 상대적으로 절연내력이 낮은 결합부분에서 부분방전이 발생하게 되어, 부분방전에 의한 점진적인 열화에 의하여 절연특성이 상당히 악화되면 결국 절연파괴에 도달할 수도 있다.

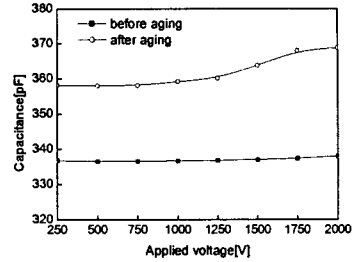


그림 4. 열화 전 · 후의 정전용량 변화.

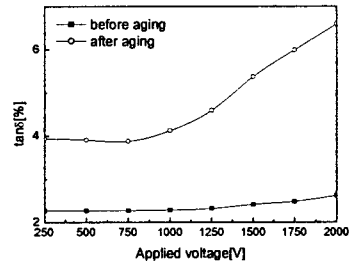
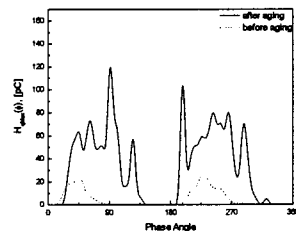


그림 5. 열화 전 · 후의 $\tan\delta$ 변화.

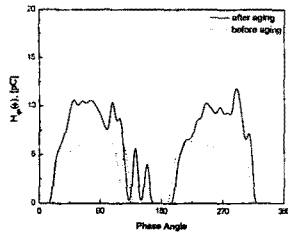
2.3.2 부분방전특성

그림 6(a)~(d)는 열화 전 · 후의 부분방전의 통계적 분포를 나타내고 있다. 그림에서도 알 수 있듯이 열화후에 방전량이나, 발생율이 더 많게 나타나고 있으며, 그림 6(a)는 최대방전 전하량의 분포패턴을 나타낸 것으로 열화전에는 방전발생 위상각이 양의 주기에서는 12~85°, 음의 주기에서는 200~270°에서 나타났으며, 열화후에는 20~140°, 190~330°에서 나타내었다. 최대방전 크기도 열화전에는 30(pC)이었으며, 열화후에는 150(pC)으로 더 큰 값을 나타내었다.

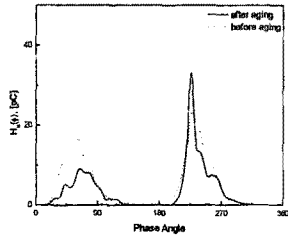
그림 6(d)를 보면 열화전에는 작은 크기의 부분방전이 많이 발생을 하다가, 열화후에는 부분방전 크기가 큰 것이 더 많이 발생을 하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 것은 열열화에 의해서 내부의 미소 보이드 크기가 커지거나 더 많이 생긴 것으로 앞의 유전손실 측정과 부합하는 결과이다. 그림 7은 인가전압 1.5 kV에서 3차원 분포(Φ -q-n)를 나타내며, 넓은 위상각의 범위에서 부분방전이 분포하고 있는 것을 볼 수가 있다.



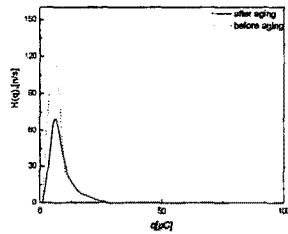
(a) $H_{qMax}(\Phi)$ distribution



(b) $H_{qn}(\phi)$ distribution



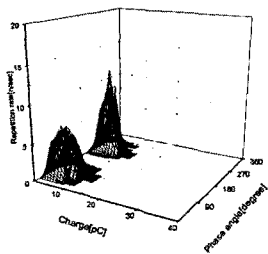
(c) $H_n(\phi)$ distribution



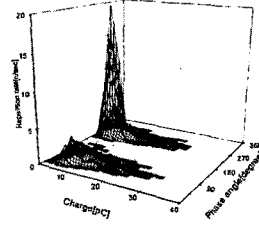
(d) $H_q(\phi)$ distribution

그림 6. 부분방전 통계적 분포(인가전압 1.5 kV).

부분방전의 패턴분류에는 부분방전의 3차원 패턴인 ϕ - q - n 분포의 데이터 자체를 사용하는 방법과, ϕ - q - n 분포로부터 펄스의 발생 위상각에 따른 펄스의 평균 크기 분포 $H_{qavg}(\phi)$, 위상각에 따른 펄스의 최대 크기 분포 $H_{qmax}(\phi)$, 위상각에 따른 펄스의 발생 빈도수 분포 $H_n(\phi)$, 펄스의 크기-발생 빈도수 $H_q(n)$ 와 같은 분포를 이용하여 여러 가지 통계적 파라미터를 이용하여 열화전후의 비교하였다.



(a) Before aging



(b) After aging

그림 7. 부분방전 3차원분포(인가전압 1.5 kV)

3. 결 론

실제품과 동일하게 견인전동기의 고정자 코일로 사용되고 있는 것을 피시험체로 하여 인버터 전압을 인가해서 가속열화 시험을 실시하였다. 가속열화를 실시하면서 정전용량, 유전손실을 측정하였고, 부분방전의 통계량 및 분포 변화를 검토한 결과는 다음과 같다.

- 모의 인버터전압과 열에 의한 가속열화 전후의 정전용량과 유전손실을 검토한 결과 정전용량은 열화후에 감소하였고, 유전손실은 증가하는 경향을 보이고 있으나, 이것은 전체적인 열화진전의 커다란 변화를 의미하지는 않으며 이러한 경향의 원인은 코일 내부에 결함이 증가하기 때문에 나타난 결과로 보여진다.
- 유전손실 크기는 열화후에 증가하였으며, 급증하는 시점은 부분방전 개시전압과 일치하고 있었고, 열화후에 더 크게 증가하였다. 따라서 이러한 유전손실과 정전용량을 측정하여 견인전동기의 상태진단 및 관리에 활용이 가능할 것이다.
- 부분방전의 측정결과 방전개시전압은 큰 차이를 나타내지는 않았지만, 방전분포를 보면 열화후에 최대방전량이 더 크게 발생을 하였고, 발생을 또한 증가하였다. 또한 부분방전분포의 통계량에서도 열화전후에 차이를 보이고 있어 통계량을 이용한 열화상태진단이 가능할 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- (1) C. Petrarca, L. Egiziano, V. Tucci, and M. Vitelli., "Investigation on Performance of Insulation Materials for Inverter-fed Traction Motors", CEIDP-Vol. 2, p.564, 1998
- (2) R. Goffeaux, M. Krecke, B. Comte, M. Cottet, and B. Fruth., "Dielectric Test Methods for Rotating Machine Stator Insulation Inspection", CEIDP-Vol. 2, p.528, 1998
- (3) Jong-Bae Wang et al., "Degradation Evaluation of Insulation System for Form-Wound Stator Coils for Traction Motors", ICEE 1999-Vol. 2, p. 243, 1999
- (4) 한국철도기술연구원, "전동차 전기추진장치의 고장예방 및 유지관리자동화 시스템 기술개발 - 1차년도 보고서", 2000
- (5) Alexandra MBAYE and Thierry LEBEY, "Analytical Approach of PD Activity in Low Voltage Motors FED by Inverters", IEEE International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, p. 161, 1998