

견인전동기 고정자 권선의 절연진단 특성

김희동*, 김충호*, 박영**, 박현준**

* 한전 전력연구원, ** 한국철도기술연구원

Characteristics of Insulation Diagnostic in Traction Motor Stator Windings

Hee-Dong Kim*, Chung-Hyo Kim* and Young Park** and Hyun-June Park**

* Korea Electric Power Research Institute, ** Korea Railroad Research Institute

Abstract

Diagnostic tests are used to evaluate the insulation condition of stator windings in traction motor. These tests included ac current, tan delta and maximum partial discharge. The insulation condition of stator windings was assessed by three test items. The stator windings of traction motor were in good condition. After completing the diagnostic tests, the stator windings of traction motors were subjected to gradually increasing ac voltage, until the insulation punctured. No. 5 stator windings failed near rated voltage of 18.9 kV. The breakdown voltage of No. 1 stator windings was 13.0. The failure was located in a line-end coil at the exit from the core slot.

Key Words : traction motor, diagnostic test, stator winding, insulation, breakdown

1. 서 론

고속철도와 지하철 등에서 사용되는 철도차량용 견인전동기는 빈번한 기동과 정지, 최대 330km/h의 고속주행 및 진동 등 열악한 운전환경을 갖고 있기 때문에 예상치 못한 고장을 발생시킬 수 있다. 특히, 전기적인 고장은 주로 소선절연재료의 손상에 의해 소선단락이 발생함에 따라 치중적으로 절연파괴가 일어난다[1~3].

견인전동기 고정자 권선의 주절연재료로 캡톤 테이프(Kapton tape)를 사용하고 있으며, 운전중에 열적, 기계적, 전기적 응력(stress) 및 외부환경에 의한 열화요인이 단독 혹은 복합적으로 작용한다. 열적요인은 열응력과 열분해로 분류되는데, 열응력은 기계적 응력과 더불어 균열(crack)을 발생시키고 열분해는 에폭시의 분해에 의한 가스압력이 증가하여 접착강도를 저하시켜 계면에서 박리를 발생시킨다. 외부환경에 의한 열화는 먼지, 오일 및 습분의 유입으로 인해 고정자 권선 표면에서 오손이 발생한다.

본 논문에서는 2.3 kV급 견인전동기 고정자 권선의 절연열화 상태를 분석하기 위해 도체표면과 주절연재료 내부에서 공극, 반도체층 손상 및 소선단락 등과 같은 인위적인 결함을 갖는 4개 종류의 권선과 정상적인 권선을 제작하였다. 5가지 종류의 권선을 견인전동기 고정자에 설치하

고 절연진단을 수행하여 절연열화 상태를 분석하였다. 절연진단 시험은 교류전류, 유전정접 및 부분방전 크기 등을 측정하여 종합적으로 판정하였다.

2. 고정자 권선 제작

표 1. 견인전동기 고정자 권선의 종류

권선 번호	결함요소	권선수
No. 1	소선단락	10개
No. 2	도체표면에서 공극	10개
No. 3	주절연재료 내부에서 공극	8개
No. 4	반도체층이 제거된 권선	10개
No. 5	정상인 권선	10개

2.3 kV급 견인전동기 고정자 권선에서 절연열화 상태를 분석하기 위해 5가지 종류의 권선을 제작하였다. 권선은 10개의 도체가 2병렬로 구성되어 있으며, 실제로 견인전동기 고정자 슬롯 내부에 표 1과 같이 인위적인 결함을 갖는 4개 종류의 권선과 정상적인 권선을 48개의 슬롯에 설치하였다. 결함요소별로 절연진단 특성을 명확하게 측정하여

실제 견인전동기 고정자 권선의 절연열화 분석에 활용하고자 한다. 그림 1은 견인전동기 5가지 종류의 고정자 권선을 나타내었다.

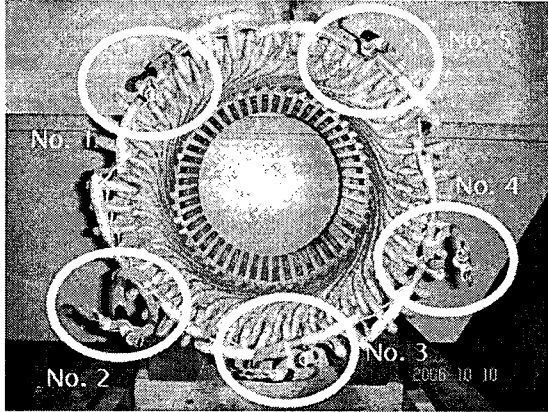


그림 1. 견인전동기 고정자 권선

3. 시험방법

본 논문은 견인전동기 고정자 권선에서 절연진단 시험을 수행하였다. 5가지 종류의 고정자 권선에 교류전류, 유전정점 및 부분방전 시험을 위해 웨링브리지(Schering Bridge), 커플링 캐패시터(coupling capacitor) 및 부분방전 측정기(partial discharge detector : PDD, Tettex Instruments TE 571)를 사용하였다. 웨링브리지는 전원장치(HV supply, Type 5283), 브리지(Bridge, Type 2818) 및 공진 인덕터(resonating inductor, Type 5285)로 구성되어 있다.

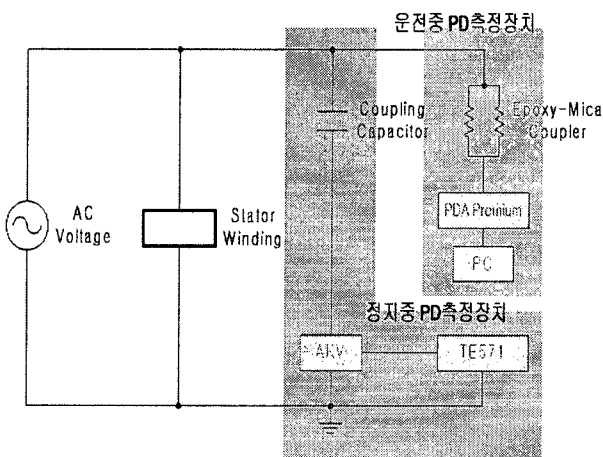


그림 2. 견인전동기 부분방전 시험 회로도

그림 2는 견인전동기 고정자 권선에서 부분방전을 측정하기 위한 회로도를 나타내었다. 견인전동기 고정자 권선에 웨링브리지(Tettex Instruments)를 연결하여 교류전압을 인가하며, 커플링 캐패시터(Tettex Instruments, 4.000pF)

는 권선에서 유입되는 신호를 커플링 유니트(coupling unit, Tettex Instruments AKV 572)에 보내어 증폭한 후 부분방전 측정기에서 방전크기를 측정하였다. 부분방전 측정기의 주파수 대역폭은 40 ~ 400kHz 이다.

4. 시험결과 및 고찰

4.1 교류전류, 유전정점 및 부분방전 크기 분석

그림 3은 교류전압을 2.3kV까지 증가시키면서 교류전류와 전압 사이의 특성을 보였으며, ΔI 가 No. 1 ~ No. 5에서 0.14% ~ 0.50%로 양호하게 나타났다. 그림 4는 교류전압을 2.3kV까지 증가시키면서 $\tan\delta$ 와 전압 사이의 특성을 나타내었으며, $\Delta \tan\delta$ 가 No. 1 ~ No. 5에서 0.03% ~ 0.09%로 매우 낮게 분석되었다. $\Delta \tan\delta$ 가 매우 낮고 유전정점 특성이 양호하기 때문에 고정자 권선 절연재료의 내부가 양호하게 판단되었다. 또한, 유전정점 특성을 분석하면 부분방전의 발생 여부, 부분방전의 개시전압 및 부분방전 발생량의 평균적인 값을 예측할 수 있다. $\tan\delta$ -전압 특성에서 유전정점의 변화가 거의 없기 때문에 부분방전 발생량도 작을 것으로 예상할 수 있다.

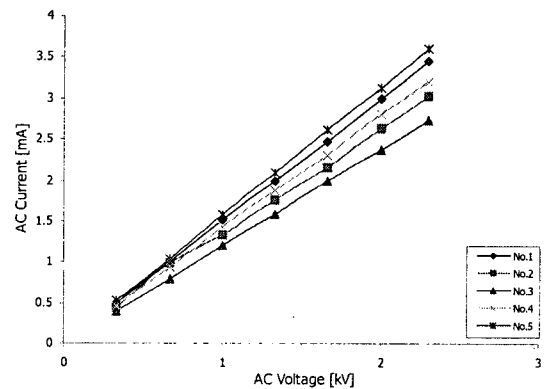


그림 3. 견인전동기의 교류전류-전압 특성

부분방전을 측정할 때 계통잡음은 No. 1과 No. 2 ~ No. 5에서 각각 400pC, 600pC이며, 정격전압 2.3kV에서 부분방전 크기는 5개 종류의 권선에서 모두 400pC ~ 600pC으로 계통잡음 범위로 낮게 측정되었다. 부분방전 개시전압은 No. 1 ~ No. 5 권선 모두 3.0kV에서 나타났다. 따라서 교류전류-전압 특성에서 ΔI 및 $\tan\delta$ -전압 특성에서 $\Delta \tan\delta$ 와 마찬가지로 부분방전의 크기도 매우 작기 때문에 견인전동기 고정자 권선은 절연열화가 거의 발생하지 않았으며, 절연재료의 상태가 매우 양호하게 평가되었다.

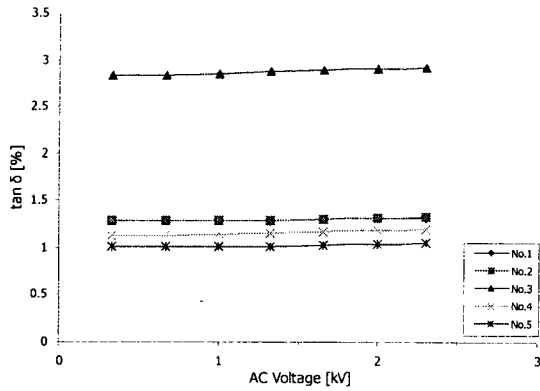


그림 4. 견인전동기의 $\tan \delta$ -전압 특성

4.2 절연파괴 특성

표 2에서 나타난 바와 같이 2.3kV급 견인전동기의 ΔI , $\Delta \tan \delta$ 의 크기 및 절연파괴 전압 등을 나타내었다. No. 5 권선의 절연파괴 전압이 18.9kV로 가장 높고, No. 1 권선의 절연파괴 전압이 13.0kV로 가장 낮게 분석 되었다. 그리고 No. 2, 3, 4는 각각 14.5kV, 13.3kV, 13.9kV에서 절연파괴가 발생하였다. 2.3kV급 견인전동기에서 운전에 필요한 최소의 절연내력은 2E+1kV, 즉 5.6kV에서 1분 이상 견뎌야 사용이 가능하다[5]. 일반적으로 절연상태가 양호한 고압전동기의 절연내력은 정격전압의 4~5배 범위를 유지하고 있다. 그러나 견인전동기의 절연내력은 정격전압의 5.6~8.2배 범위를 유지하고 있다. 견인전동기 고정자 권선의 주절연재료로 케톤 테이프를 사용함에 따라 절연파괴 전압이 마이카 테이프를 사용하는 고압전동기에 비해 높게 나타나고 있다.

표 2. 견인전동기의 절연열화 특성

권선 번호	$\Delta \tan \delta$ [%]	ΔI [%]	파괴전압 [kV]
No. 1	0.03	0.20	13.0
No. 2	0.05	0.50	14.5
No. 3	0.09	0.44	13.3
No. 4	0.07	0.31	13.9
No. 5	0.05	0.14	18.9

5. 결론

No. 5 권선의 절연파괴 전압이 18.9kV로 가장 높고, No. 1 권선의 절연파괴 전압이 13.0kV로 가장 낮게 분석 되었다. 그리고 No. 2, 3, 4 권선은 각각 14.5kV, 13.3kV,

13.9kV에서 절연파괴가 발생하였다. 따라서 인위적인 결함을 갖는 4개 종류의 권선에 비해 정상적인 권선에서 절연파괴 전압이 높게 나타나고 있음을 확인할 수 있었다. 주 절연재료로 케톤 테이프를 사용하는 견인전동기의 절연내력은 정격전압의 5.6~8.2배 범위를 유지하고 있으며, 마이카 테이프를 사용하는 고압전동기에 비해 높게 나타나고 있다. 5개 종류의 권선 슬롯단부에서 절연파괴가 발생하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] M. Katz and R. J. Theis, "New High Temperature Polyimide Insulation for Partial Discharge Resistance in Harsh Environments", IEEE Electrical Insulation Magazine, pp. 24 ~ 30, 1997.
- [2] 김희동, "고압전동기 고정자 권선 절연재료의 미세구조 특성", 한국전기전자재료학회 춘계학술대회, pp. 513 ~ 517, 1999.
- [3] P. Walker and J. N. Champion, "Experience with Turn Insulation Failures in Large 13.2kV Synchronous Motors", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 6, No. 4, pp. 670 ~ 677, 1991.
- [4] H. Yoshida and K. Umemoto, "Insulation Diagnosis for Rotating Machine Insulation", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. EI-21, No 6, pp. 1021 ~ 1025, Dec. 1986.
- [5] V. Warren, G. C. Stone and M. Fenger, "Advancements in Partial Discharge Analysis to Diagnose Stator Winding Problems", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 497 ~ 500, 2000.