

논문 20-7-12

견인전동기 고정자 권선의 절연상태 분석

Analysis of Insulation Condition in Traction Motor Stator Windings

김희동^{1,a}, 박 영²

(Hee Dong Kim^{1,a} and Young Park²)

Abstract

Diagnostic, surge and ac breakdown tests are widely used to evaluate the insulation condition of stator winding in traction motor. Diagnostic test included ac current, tan delta and maximum partial discharge. The result of diagnostic test indicates that five kinds of stator windings are good condition. Surge test was performed to confirm the healthy of turn insulation in stator windings. This test is very easy to detect the turn insulation failure between normal and defect stator windings. After completing the diagnostic test, ac breakdown test has conducted gradually increasing ac voltage, until the stator winding punctured. No. 5 stator windings failed near rated voltage of 18.9 kV. The breakdown voltage of No. 1 stator windings was 13.0 kV. The ac breakdown voltage of normal winding is about 1.45 times higher than that of defect windings. 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 voltage

1. 서론

고속철도와 지하철 등에서 사용되는 철도차량용 견인전동기는 빈번한 기동과 정지, 최대 330 km/h의 고속주행 및 진동 등 열악한 운전환경을 갖고 있기 때문에 예상치 못한 고장을 발생시킬 수 있다. 주파수를 변동하여 속도를 조정하는 견인전동기 고정자 권선은 발전기와 마찬가지로 단독적인 열화 혹은 전기적, 열적, 기계적 및 화학적인 영향에 의한 복합열화로 인해 절연파괴 메카니즘이 진전한다[1]. 또한, 견인전동기 속도 조정이 IGBT 컨버터(converter)를 주로 사용함에 따라 빠른 스위칭 속도와 높은 온도로 인해 절연재료에 스트레스(stress)가 집중되어 열화가 가중된다. 따라서 견인전동기의 절연시스템은 여러 가지 요소에 의해 복

합적인 열화를 가혹하게 받음에 따라 수명이 현저하게 감소할 뿐만 아니라 높은 온도에 대한 지속적인 내구력도 일반적으로 다른 고압전동기 보다 더 고려되어야 한다. 특히, 빠른 스위칭 속도와 높은 온도로 인해 예상할 수 있는 전기적인 고장은 다양한 절연결함 혹은 소선절연재료의 손상에 의해 소선단락이 주로 발생함에 따라 최종적으로 절연파괴가 일어난다[2-5].

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. 실제로 5가지 종류의 권선을 견인전동기 고정자에 설치하고 절연진단, 서지 및 절연파괴 시험을 수행하여 절연열화 상태를 평가하였다. 운전중 모의를 위해 견인전동기 고정자 권선에 1000 pF의 에폭시-마이카 커패시터를 설치하였으며, PDA(partial discharge analyzer)를 사용하여 NQN(normalized quantity number)과 부분방전 크기(Qm)를 측정하였다.

1. 한국전력공사 전력연구원

(대전시 유성구 문지동 103-16)

2. 한국철도기술연구원

a. Corresponding Author : hdkim@kepri.re.kr

접수일자 : 2007. 2. 26

1차 심사 : 2007. 6. 5

심사완료 : 2007. 6. 8

표 1. 견인전동기 고정자 권선의 종류.

Table 1. The species of stator windings in traction motor.

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

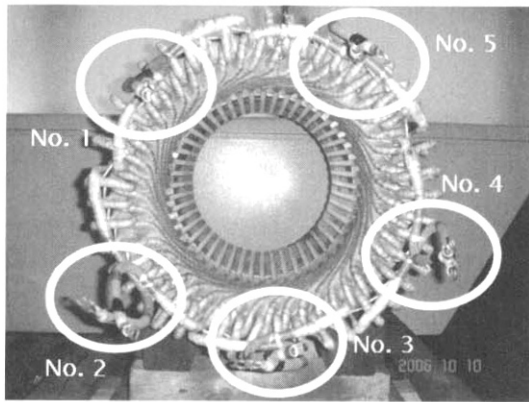


그림 1. 견인전동기 고정자 권선.
Fig. 1. Stator windings of traction motor.

2. 권선 제작

2.3 kV급 견인전동기 고정자 권선에서 절연열화 상태를 분석하기 위해 5가지 종류의 권선을 제작하였다. 견인전동기 고정자 권선의 주절연재료로 캡톤 테이프(Kapton tape)를 사용하고 있으며, 권선은 10개의 도체가 2병렬로 구성되어 있다. 실제로 견인전동기 고정자 슬롯 내부에 표 1과 같이 인위적인 결함을 갖는 4개 종류의 권선과 정상적인 권선을 48개의 슬롯에 설치하였다. 결함요소별로 절연진단 특성을 측정하여 실제 견인전동기 고정자 권선의 절연열화 분석과 평가에 활용하고자 한다. 그림 1은 5가지 종류의 견인전동기 고정자 권선을 나타내었다.

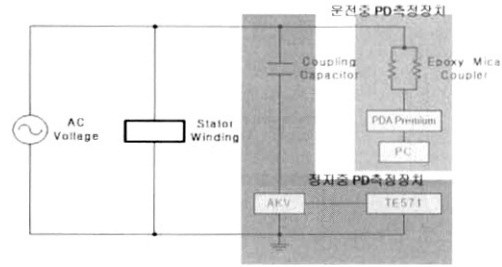


그림 2. 견인전동기 부분방전 시험 회로도.
Fig. 2. Test circuit of partial discharge in traction motor.

3. 시험 방법

본 논문은 실제로 5가지 종류의 권선을 견인전동기 고정자에 설치하고 절연진단, 서지 및 절연과파 시험을 수행하여 절연열화 상태를 평가하였다. 절연진단 시험은 교류전류, 유전정점 및 부분방전 크기 등을 측정하였으며, 서지시험을 통해 고정자 권선의 소선단락 분석과 최종적으로 절연과파 시험을 통해 절연열화 상태를 종합적으로 판정하였다. 교류전류, 유전정점 및 부분방전 시험을 위해 셰링 브리지(Schering Bridge), 커플링 캐패시터(coupling capacitor) 및 부분방전 측정기(partial discharge detector : PDD, Tettex Instruments TE 571)를 사용하였다. 셰링브리지는 전원장치(HV supply, Type 5283), 브리지(Bridge, Type 2818) 및 공진 인덕터(resonating inductor, Type 5285)로 구성되어 있다.

그림 2는 견인전동기 고정자 권선에서 정지중과 운전중에 부분방전을 측정하기 위한 회로도를 나타내었다. 견인전동기 고정자 권선에 셰링브리지(Tettex Instruments)를 연결하여 교류전압을 인가하며, 커플링 캐패시터(Tettex Instruments, 4,000 pF)는 권선에서 유입되는 신호를 커플링 유닛(coupling unit, Tettex Instruments AKV 572)에 보내어 증폭한 후 부분방전 측정기에서 방전크기를 측정하였다. 부분방전 측정기의 주파수 대역폭은 40~400 kHz 이다. 운전중 모의를 위해 견인전동기 고정자 권선에 예폭시-마이카 커플러(1000 pF, Adwel)를 설치하였다. PDA(partial discharge analyzer, Adwel)를 사용하여 NQN과 최대부분방전 크기(Qm)를 분석하여 절연열화 상태와 정도를 분석하였다. 또한, 견인전동기 고정자 권선의 소선단락 여부를 평가하기 위해 소선상태가 정상인 권선과 소선단락된 권선을 사용하여 서지시험(advanced winding analyzer, Baker Instrument)을 수행하였다.

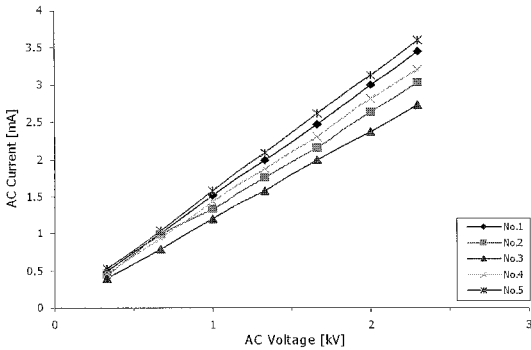


그림 3. 견인전동기의 교류전류-전압 특성.
Fig. 3. AC current-voltage characteristics of traction motor.

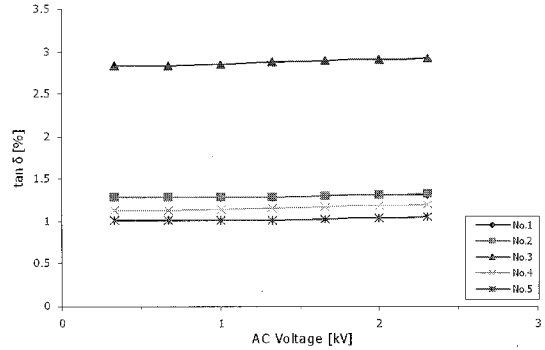


그림 4. 견인전동기의 tanδ-전압 특성.
Fig. 4. Tanδ-voltage characteristics of traction motor.

4. 시험결과 및 고찰

4.1 교류전류와 유전정점 분석

그림 3은 교류전압을 2.3 kV까지 증가시키면서 교류전류와 전압 사이의 특성을 보였으며, 전류증가율을 나타내는 ΔI 가 No. 1~No. 5에서 0.14 %~0.50 %로 양호하게 분석되었다. 그림 4는 교류전압을 2.3 kV까지 증가시키면서 $\tan\delta$ 와 전압 사이의 특성을 나타내었으며, No. 1과 No. 2의 $\tan\delta$ 크기는 거의 일치하였다. 그리고 No. 3은 No. 5의 $\tan\delta$ 크기에 비해 2.7배 이상이 높게 나타났으며, 캡톤 테이프를 사용하는 견인전동기 고정자 권선의 주절연재료 내부에서 공극을 갖도록 제작함에 따라 $\tan\delta$ 가 높게 나타난 것으로 해석할 수 있다.

일반적으로 고압전동기 고정자 권선에서 그림 4와 같은 $\tan\delta$ -전압 특성은 이상적인 절연재료에서 볼 수 있는 현상이다. $\Delta\tan\delta$ 는 No. 1~No. 5에서 0.03 %~0.09 %로 매우 낮게 나타났으며, ΔI 와 $\Delta\tan\delta$ 가 낮기 때문에 고정자 권선 절연재료의 내부가 양호하게 판단되었다. 고압전동기에서 유전정점 특성을 분석하면 부분방전의 발생 여부, 부분방전의 개시전압 및 부분방전 발생량의 평균적인 값을 어느 정도 예측할 수 있다. 그러나 $\tan\delta$ -전압 특성에서 유전정점의 변화가 거의 없기 때문에 부분방전 발생량도 작을 것으로 예상할 수 있다.

4.2 부분방전 크기 분석

부분방전을 측정할 때 계통잡음은 No. 1~No. 5에서 각각 400 pC~600 pC이며, 상전압(1.33 kV)에서부터 정격전압 2.3 kV까지 전압을 증가하면서 부분방전 크기를 측정된 결과 5개 종류의 권선에서

모두 400 pC~900 pC으로 계통잡음 범위보다 약간 높게 측정되었다. 또한, 부분방전 개시전압도 No. 1~No. 5 권선 모두 3.0 kV 이상에서 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. 표 2는 견인전동기 고정자 권선에 인가전압을 상전압(1.33 kV)과 상전압의 1.25배인 1.66 kV로 증가시키면서 NQN과 Q_m 크기를 측정하여 나타내었다. NQN과 Q_m 의 크기는 전압이 증가함에 따라 미세한 변화가 분석되었으며, No. 1의 NQN과 Q_m 이 제일 크고 No. 3, No. 4, No. 2, No. 5 순서로 낮게 나타났다. 따라서 캡톤 테이프를 사용하는 견인전동기 고정자 권선의 절연열화 상태를 분석하기 위해 도체표면과 주절연재료 내부에서 공극, 반도체층 손상 및 소선단락 등과 같은 인위적인 결함을 갖도록 제작하였으나 전반적으로 절연열화에는 크게 영향을 미치지 못하는 시험결과를 나타내었다.

4.3 소선단락 분석

정상 운전중에 견인전동기 고정자 권선에서 소선사이의 절연재료는 상대적으로 낮은 전기적 스트레스(stress)를 받는다. 그러나 스위칭 운전과 같은 비정상적인 조건에서 소선절연재료는 매우 높은 전기적 스트레스를 받을 수 있다. 만약에 소선절연재료가 약하면 그런 조건에서 절연파괴가 발생할 수 있다[6]. 따라서 견인전동기에서 많이 발생하는 주절연재료 파괴는 소선절연재료 손상으로부터 시작되는 것으로 알려지고 있다[2,3]. 서지(surge)시험은

표 2. NQN과 Qm 크기.

Table 2. The magnitude of NQN and Qm.

견인전동기		1.33 kV	1.66 kV
No. 1	NQN+	2	14
	NQN-	15	15
	Qm+	0	16
	Qm-	16	16
No. 2	NQN+	0	6
	NQN-	8	10
	Qm+	0	0
	Qm-	0	0
No. 3	NQN+	4	10
	NQN-	11	11
	Qm+	0	16
	Qm-	16	16
No. 4	NQN+	5	10
	NQN-	11	9
	Qm+	0	0
	Qm-	16	16
No. 5	NQN+	0	4
	NQN-	4	6
	Qm+	0	0
	Qm-	0	0

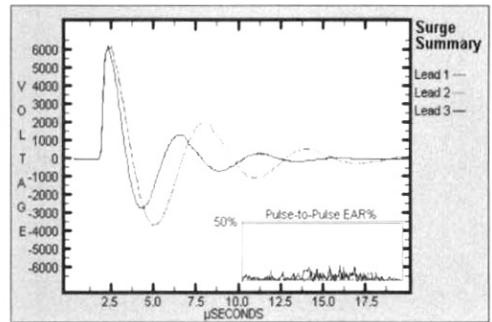
견인전동기 고정자 권선에서 소선절연재료의 단락 여부를 평가할 수 있다. 반복적인 서지 발생기로부터 0.1~0.2 μ s의 상승시간을 갖는 서지가 고정자 권선에서 소선절연재료의 단락상태를 시험하기 위해 사용되었다.

표 3은 서지시험의 조건을 나타내었으며, 고정자 권선의 단락여부를 평가하기 위해 소선상태가 양호한 권선과 소선단락된 권선을 사용하였다. 첫 번째 서지시험에서는 lead 1과 2는 소선상태가 양호한 권선을 연결하였으며, lead 3은 소선단락된 권선을 연결하고 DC 5600 V를 인가하였다. 두 번째 서지시험에서는 lead 1, 2 및 3 모두 소선상태가 양호한 권선을 연결하였다. 소선상태가 양호한 권선(No. 2, No. 5)과 소선단락된 권선(No. 1)을 사용하여 총 2회 서지시험을 수행한 결과 그림 5(a)에서는 lead 1, 2는 측정결과가 일치함에 따라 양호하고 lead 3에서만 소선단락이 발생하고 있음을 알 수 있었다. 그림 5(b)에서는 lead 1, 2 및 3 모두 측정결과가 일치함에 따라 소선의 절연상태가 양호하게 판정되었다.

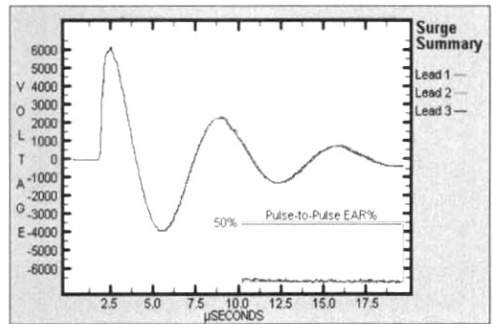
표 3. 서지시험의 조건.

Table 3. The condition of surge test.

Surge Test	Lead 1	Lead 2	Lead 3	V _{PEAK}
1	No. 2	No. 5	No. 1	5600 V
2	No. 2	No. 4	No. 5	5600 V



(a) 소선단락 발생



(b) 양호

그림 5. 서지시험의 결과.

Fig. 5. The result of surge test.

4.4 절연파괴 특성

표 4는 2.3 kV급 견인전동기 고정자 권선에서 측정된 ΔI 와 $\Delta \tan \delta$ 의 크기 및 AC 절연파괴 전압 등을 나타내었다. No. 5 권선의 절연파괴 전압이 18.9 kV로 가장 높고, No. 1 권선의 절연파괴 전압이 13.0 kV로 가장 낮게 분석되었다. 그리고 No. 2, 3, 4는 각각 14.5 kV, 13.3 kV, 13.9 kV에서 절연파괴가 발생하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 No. 1의 NQN과 Qm이 제일 크고 No. 5는 가장 작으며, No. 3, No. 4, No. 2 순서로 낮게 나타났다. 따라서 절연파괴 전압은 NQN, Qm 크기와 밀

표 4. 견인전동기의 절연열화 특성.

Table 4. Characteristics of insulation aging in traction motor.

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

접한 관련이 있음을 알 수 있다. 2.3 kV급 견인전동기에서 운전에 필요한 최소의 AC 절연내력은 2E+1 kV, 즉 5.6 kV에서 1분 이상 견디야 사용이 가능하다[7]. 일반적으로 절연상태가 양호한 고압전동기의 AC절연내력은 정격전압의 4~5배 범위를 유지하고 있다. 그러나 견인전동기의 AC 절연내력은 정격전압의 5.6~8.2배로 매우 높게 나타났다. 견인전동기 고정자 권선의 주절연재료는 절연특성이 우수하고 값비싼 캡톤 테이프를 사용함에 따라 마이카 테이프를 사용하는 고압전동기에 비해 절연파괴 전압이 높게 나타나고 있다.

5. 결론

견인전동기에서 5개 종류의 권선 No. 1~No. 5에서 ΔI 와 $\Delta \tan \delta$ 는 각각 0.14 %~0.50 %, 0.03 %~0.09 %로 매우 낮게 분석되었으며, 정격전압 2.3 kV에서 부분방전 크기는 모두 400 pC~900 pC으로 계통잡음보다 약간 높게 측정되었다. 교류전류, 유전정접 및 부분방전 크기가 낮기 때문에 고정자 권선 절연재료의 상태가 양호하게 평가되었다. 또한, 소선상태가 양호한 권선 2개와 소선단락된 권선 1개를 연결하고 서지시험을 수행한 결과 소선단락이 발생한 권선을 정확하게 확인할 수 있었다. No. 5 권선의 AC 절연파괴 전압이 18.9 kV로 가장 높고, No. 1 권선의 절연파괴 전압이

13.0 kV로 가장 낮게 분석 되었다. 그리고 No. 2, 3, 4 권선은 각각 14.5 kV, 13.3 kV, 13.9 kV에서 절연파괴가 발생하였다. 따라서 인위적인 결함을 갖는 4개 종류의 권선에 비해 정상적인 권선에서 절연파괴 전압이 높게 나타나고 있음을 확인할 수 있었다. 주절연재료로 캡톤 테이프를 사용하는 견인전동기의 AC 절연내력은 정격전압의 5.6~8.2배 범위를 유지하고 있으며, 마이카 테이프를 사용하는 고압전동기에 비해 높게 나타나고 있다. 5개 종류의 권선 모두 절연파괴 위치가 슬롯단부에서 발생하였다.

참고 문헌

- [1] 김희동, “발전기 고정자 권선의 절연열화 메카니즘 분석”, 전기전자재료학회논문지, 15권, 2호, p. 119, 2002.
- [2] M. Katz and R. J. Theis, “New High Temperature Polyimide Insulation for Partial Discharge Resistance in Harsh Environments”, IEEE Electrical Insulation Magazine, p. 24, 1997.
- [3] 김희동, “고압전동기 고정자 권선 절연재료의 미세구조 특성”, 한국전기전자재료학회 1999년 학술대회논문집, p. 513, 1999.
- [4] P. Walker and J. N. Champion, “Experience with turn insulation failures in large 13.2 kV synchronous motors”, IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 6, No. 4, p. 670, 1991.
- [5] 박재준, 김희동, “영상신호처리 기법을 이용한 고압전동기 고정자 권선 절연결함신호 분류”, 전기전자재료학회논문지, 20권, 1호, p. 65, 2007.
- [6] B. Gupta, “Risk in Surge Testing of Turn Insulation in Winding of Rotating Machines”, IEEE Electrical Insulation and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, p. 459, 2003.
- [7] V. Warren, G. C. Stone, and M. Fenger, “Advancements in Partial Discharge Analysis to Diagnose Stator Winding Problems”, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, p. 497, 2000.