

고압전동기 고정자 권선의 전기적 및 미세구조 특성

김희동, 주영호
한전 전력연구원

Electrical and Microstructure Properties of High Voltage Motor Stator Insula

Hee-Dong Kim and Young-Ho Ju
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - Two stator windings for high voltage motor(rated 6.6kV) were manufactured with mica tape/varnish(No. 1), and mica tape(No. 2). Electrical tests included ac current, $\tan\delta$ and partial discharge magnitude in these stator windings. Electrical properties showed that No. 1 stator winding was better than that of No. 2. Microstructure properties were conducted using scanning electron microscope(SEM) in the cross section of the straight stator windings. SEM results indicated that the mica tape interface of No. 1 stator winding was larger than that of No. 2 stator winding.

카 테이프와 시트(sheet)를 사용하였으며, 둘 다 두께가 0.13mm이고 수지(resin) 함유량은 40%이다. 테이핑(taping)시에는 1/2씩 겹쳐서 8회 감았으며, No. 1은 마이카 테이프를 감으면서 바니쉬(varnish)를 도포하고 No. 2는 마이카 테이프만을 사용하여 제작하였다. 또한 주절연재료 보호용인 글라스 테이프를 2개의 권선에서 동일하게 1/2씩 겹쳐서 감았다. 단말권선에서 컷는 부분은 보조절연물로 절연을 보강하였으며, 동선을 모양 잡기후 주절연재료를 감기전에 함침을 1회 실시하였다. 고정자 권선을 제작하여 함침전 예비건조는 110~120°C에서 12~13시간 동안 건조하였다. 그리고 진공함침은 진공도 5Torr 및 압력 1.0kg/cm에서 45분 동안 실시하였으며, 2차 함침후 2차 건조는 120~130°C에서 8시간 동안 수행하였다.

1. 서 론

고압전동기 고정자 권선은 크게 동도체(copper conductor)와 절연재료로 구성되어 있다. 절연재료는 소선절연(strand insulation), 턴절연(turn insulation) 및 주절연(groundwall insulation)으로 분류할 수 있다. 소선 절연재료는 주로 합성 에나멜(synthetic enamel)이 사용되고 턴절연재료는 마이카 테이프(mica tape), 내코로나성(corona resistant) 에나멜, 폴리이미드 필름 테이프(polyimide film tape) 등으로 제작한다. 주절연 재료는 마이카에 폴리에스터(polyester) 혹은 에폭시(epoxy) 수지를 혼합하여 테이프 형태로 제작된 마이카 테이프를 사용한다. 고정자 권선의 함침방식은 진공가압함침(vacuum pressure impregnation) 방식을 사용하며, 절연재료와 권선 제조기술의 진보에 따라 대응량화, 고압화, 소형 경량화 등이 이루어져 최근 절연계급도 F종으로 제작되고 있다[1].

본 논문에서는 정격전압 6.6kV급 고압전동기 고정자 권선을 두 가지 방법을 사용하여 제작하였다. 하나는 마이카 테이프를 감으면서 바니쉬(varnish)를 도포하고 다른 하나는 마이카 테이프만을 사용하였다. 두 개의 고정자 권선에서 교류전류, 유전정접 및 부분방전 등을 측정하여 전기적 특성의 차이점을 분석하였다. 또한, 절연재료 표면에서 미세한 구조를 분석하기 위해 고정자 권선에서 시편을 절출하였으며, SEM(Scanning Electron Microscope)을 사용하여 관찰하였다.

2. 고정자 권선의 제작

절연동선은 나동선에 에나멜 코팅(enamel coating 0.05mm)과 글라스 섬유 테이프(glass yarn tape, 0.07mm)를 사용하여 절연하였다. 주절연재료는 마이

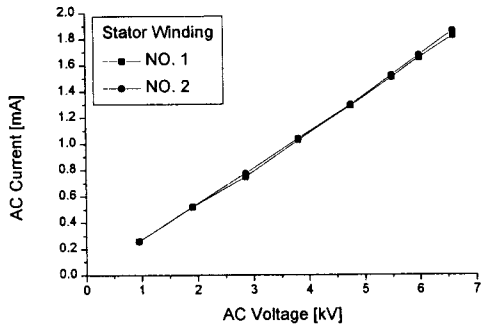
3. 시험방법

본 논문은 두 가지 방법을 사용하여 제작된 고압전동기 고정자 권선의 절연상태를 분석하기 위해 셰링브리지(Schering bridge), 커플링 캐패시터(coupling capacitor) 및 디지털 부분방전 측정기를 사용하였다. 셰링브리지는 전원장치(HV supply, Type 5283), 브리지(bridge, Type 2818) 및 공진 인덕터(resonating inductor, Type 5285)로 구성되어 있다. 발전기 고정자 권선에 셰링브리지(Tettex Instruments)를 연결하여 교류전압을 인가하며, 커플링 캐패시터(Tettex Instruments, 4,000pF)는 권선에서 유입되는 신호를 커플링 유닛(coupling unit, Tettex Instruments AKV 572)에 보내어 증폭한 후에 디지털 부분방전 측정기(Tettex Instruments TE 571)에서 방전크기 및 패턴을 측정하였다. 또한 고정자 권선 내부의 미세적 관찰을 위해 주사형 전자현미경(Scanning Electron Microscope, 일본 JEOL, JSM-6400)을 이용하였다.

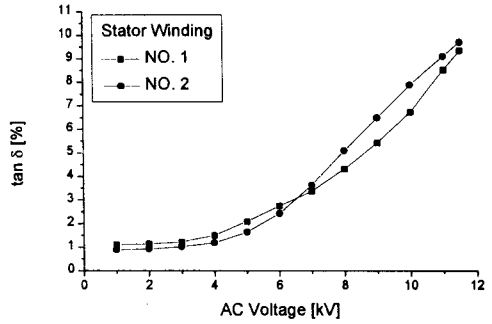
4. 시험결과 및 고찰

4.1 전기적 분석

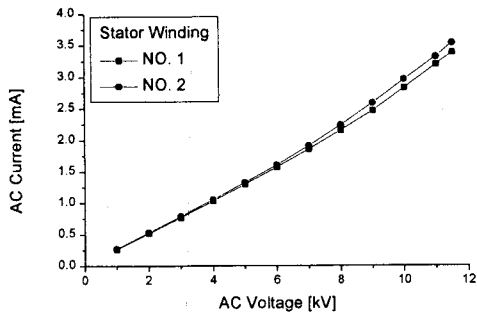
6.6kV급 고압전동기 고정자 권선을 제작하여 6.6kV에서 11.5kV까지 전압을 인가하면서 교류전류-전압 특성을 측정하여 그림 1에 나타냈다. 표 1에 나타낸 바와 같이 6.6kV에서 ΔI 는 No. 1, 2 권선이 각각 2.82%, 3.92%으로 분석되어 양호하게 판정되었다. 그리고 11.5kV에서 ΔI 는 No. 1, 2 권선이 각각 13.08%, 15.13%으로 증가하였다. ΔI 는 No. 2에 비해 No. 1 권선이 낮게 나타나기 때문에 교류전류-전압 특성이 더 우수하게 분석되었다. 일반적으로 ΔI 가 작을수록 절연재료의 상태를 양호하게 판정한다.



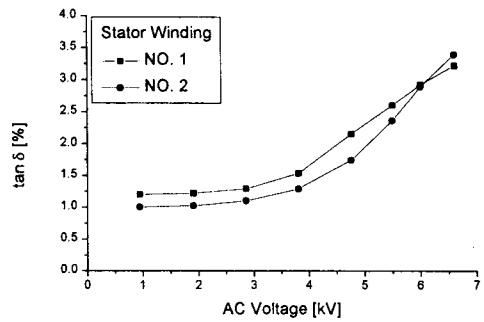
(a) 6.6kV



(a) 6.6kV



(b) 11.5 kV



(b) 11.5 kV

그림 1. 교류전류-전압 특성

그림 2. tan δ-전압 특성

유전특성에서 부분방전의 발생 여부, 부분방전의 개시전압 및 부분방전 발생량의 평균적인 값을 예측할 수 있다. 그림 2는 교류전압을 6.6kV에서 11.5kV까지 증가 시키면서 tan δ-전압 특성을 나타냈다. No. 1, 2 권선의 tan δ-전압 특성이 3kV ~ 4kV 사이에서 증가 함으로 이 전압 부근에서 부분방전 개시가 발생되고 No. 1에 비해 No. 2 권선의 tan δ 증가 패턴이 높게 나타남으로 부분방전 크기도 No. 2 권선이 높을 것으로 예상된다. 그림 2(b)에서 알 수 있는 바와 같이 No. 2 권선은 7kV에서 급격하게 증가하고 있다.

표 1에 나타낸 바와 같이 6.6kV에서 $\Delta \tan \delta$ 는 No. 1, 2 권선이 각각 2.00%, 2.37%로 분석되어 양호하게 판정되었다. 그리고 11.5kV에서 $\Delta \tan \delta$ 는 No. 1, 2 권선이 각각 8.19%, 8.77%로 증가하였다. $\Delta \tan \delta$ 도 No. 2에 비해 No. 1 권선이 낮게 나타나기 때문에 tan δ-전압 특성이 더 우수하게 분석되었다. 일반적으로 $\Delta \tan \delta$ 가 작을수록 절연재료의 상태를 양호하게 판정하고 있다.

고압전동기 고정자 권선에서 정격전압까지 전압을 인가하면서 부분방전을 측정하였다. 표 2는 상전압에서 정격전압까지 전압을 인가하면서 No. 1, 2 권선에서 부분방전 크기를 나타냈다. 부분방전 측정시 계통 잡음은 No. 1, 2 권선에서 각각 530pC, 640pC이며, 부분방전 개시전압은 각각 3.8kV, 3.6kV로 나타났으며, No. 2에 비해 No. 1 권선이 높게 분석되었다. 부분방전 개시전압은 그림 2(a)의 tan δ-전압 특성에서 설명한 것 같이 인가전압 증가에 따른 tan δ 증가점과 일

표 1. 고정자 권선의 ΔI 와 $\Delta \tan \delta$

| 권선명 | 인가전압 | | |
|-------|--------------------------|---------|-------|
| | 6.6 kV | 11.5 kV | |
| NO. 1 | ΔI [%] | 2.82 | 13.08 |
| | $\Delta \tan \delta$ [%] | 2.00 | 8.19 |
| NO. 2 | ΔI [%] | 3.92 | 15.13 |
| | $\Delta \tan \delta$ [%] | 2.37 | 8.77 |

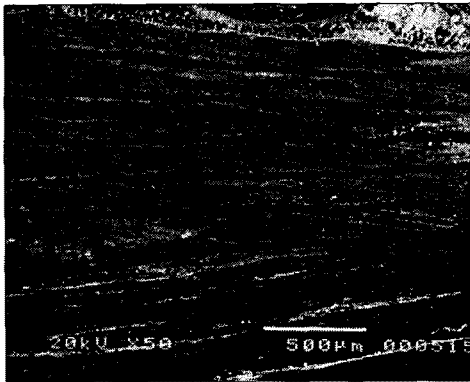
치하고 있다. 부분방전 크기는 상전압에서 No. 1, 2 권선이 각각 1.2nC, 2.2nC이며, 6.6kV에서 각각 2.4nC, 3.6nC로 증가하였다. 그림 3과 그림 4는 No. 1, 2 권선에서 4.76kV까지 전압을 인가하면서 부분방전 패턴을 측정하여 나타냈는데 모두 내부방전(internal discharge)이 발생되고 있다.

표 2. 고정자 권선의 부분방전 크기

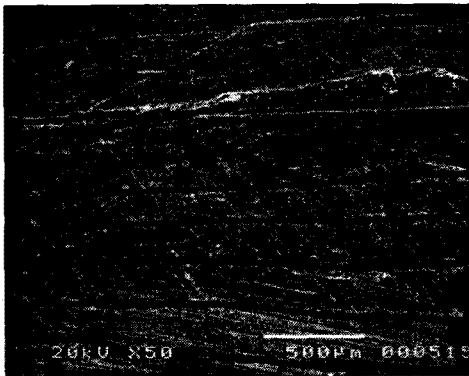
| 권선명 | 외부 잡음 [pC] | 방전발생 / 소멸전압 [kV] | 인가전압 [kV] | | | |
|-------|------------|------------------|-----------|-------|-------|-------|
| | | | 3.81 | 4.76 | 6.0 | 6.6 |
| NO. 1 | 530 | 3.8/3.6 | 1.2nC | 1.9nC | 2.1nC | 2.4nC |
| NO. 2 | 640 | 3.2/3.0 | 2.2nC | 2.8nC | 3.4nC | 3.6nC |

4.2 미세구조 분석

절연재료 표면에서 미세한 구조를 분석하기 위해 고정자 권선에서 시편을 절출하였으며, SEM을 사용하여 관찰하였다. 그림 3(a), (b)는 No. 1, 2 권선에서 절출한 시편의 SEM 사진을 나타냈으며, 얇은 회색은 마이카이고 짙은 회색은 에폭시를 나타낸다. 그림 3에서 나타난 바와 같이 마이카 테이프를 8회 감았음을 알 수 있었으며, No. 1, 2 권선 내부의 구조가 거의 유사하게 분석되었다. No. 1 권선은 마이카 테이프를 감으면서 바니쉬(vernish)를 도포하였기 때문에 No. 2에 비해 마이카 테이프 사이의 경계(interface)가 크게 나타나고 있으며, 바니쉬의 불규칙한 침투에 의해 마이카 테이프의 구조도 균일하게 나타나지 않음을 알 수 있었다. 그리고 No. 2 권선에 비해 No. 1 권선에서 전기적 특성이 우수하게 분석된 것은 바니쉬를 도포함에 따라 마이카 테이프 사이의 경계에서 박리(delamination)와 미소 크랙(small crack)이 감소한 것으로 분석되었다.



(a) No. 1 권선



(b) No. 2 권선

그림 3. 고정자 권선의 SEM 사진

5. 결 론

고압전동기 고정자 권선을 두 가지 방법으로 제작하여 전기적 및 미세구조 특성을 분석하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) No. 1 권선이 No. 2 권선에 비해 교류전류, 유전정접 및 부분방전 등 전기적 특성을 분석한 결과 더 우수하게 판정되었으며, $\tan\delta$ -전압 특성에서 부분방전의 개시전압과 부분방전 발생량의 평균적인 값을 예측할 수 있었다.

(2) No. 1 권선은 마이카 테이프를 감으면서 바니쉬를 도포하였기 때문에 No. 2에 비해 마이카 테이프 사이의 경계가 크게 나타나고 있으며, 바니쉬의 불규칙한 침투에 의해 마이카 테이프의 구조도 불균일하게 나타남을 확인할 수 있었다.

(3) No. 2 권선에 비해 No. 1 권선에서 전기적 특성이 더 우수하게 분석된 것은 바니쉬를 도포함에 따라 마이카 테이프 사이의 경계에서 박리와 미소 크랙이 감소한 것으로 분석되었다.

(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. 2-1~2-10, 1989.
- [2] H. Yoshida and K. Umemoto, "Insulation Diagnosis for Rotating Machine Insulation", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-21, No. 6, pp. 1021-1025, 1986.
- [3] Hee Dong Kim, Young Ho Ju and Hong Woo Rhew, "Effect of Aging on the Microstructure Evolution, Thermal and Mechanical Properties of Mica/Epoxy Composite", IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 537-541, 1999.