

대형 터빈발전기 고정자 권선의 미세구조 분석

김희동, 주영호, 송성일
한전 전력연구원

Microstructure Analysis of Large Turbine Generator Stator Insulations

Hee-Dong Kim, Young-Ho Ju and Seong-II Song
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - Large turbine generator(rated 22kV) has failed in the stator winding area during normal operation. The capacitance and $\tan\delta$ were measured by Schering bridge in the zone 1, 2 and zone 3-6 stator windings. The capacitance and $\tan\delta$ in the zone 1, 2 of stator winding were higher than those of zone 3-6 in the stator winding. Experiments on microstructure property were conducted in the zone 1, 2 and zone 3-6 insulations, which were drawn out from stator windings of the large turbine generator. Microstructure analysis was characterized using scanning electron microscope(SEM). SEM results indicated that several isolated delaminations occurred at the interface of mica/epoxy insulations. Both thermal and mechanical aging cause the delamination.

(Scanning Electron Microscope : SEM)을 사용하여 분석하였다. 고정자 권선의 절연과피 인접부분에서 마이카/에폭시 복합재료의 층간계면을 관찰한 결과 박리가 부분적으로 발생하였다.

2. 시험방법

본 논문에서는 대형 터빈발전기(정격전압 22kV) 고정자 권선에서 캐패시턴스 및 유전정점을 측정하기 위해 웨링브리지(Schering Bridge)를 사용하였다. 웨링브리지는 전원장치(HV supply, Type 5283), 브리지(Bridge, Type 2818) 및 공진 인덕터(rsonating inductor, Type 5285)로 구성되어 있다. 고정자 권선의 절연과피 원인을 규명하기 위해 과피 인접부분과 건전부분에서 6개의 시편을 절출하였다. 미시적 관찰을 위해 시편의 단면을 주사형 전자현미경(Scanning Electron Microscope, 일본 JEOL, JSM-6400)을 사용하였다.

1. 서 론

발전기 고정자 권선의 주절연재료로 마이카 테이프(mica tape)가 사용되고 있으며, 이는 실제 운전 중에 열적, 기계적, 전기적 및 환경적인 원인에 의해 절연 열화가 진행된다. 열적 원인은 과부하, 주기적인 기동정지, 소선절연(strand insulation)의 손상, 마이카 테이프의 박리 등에 의해 일어나고, 기계적 원인은 진동, 켈트(wedge)와 권선 매듭(tie)의 느슨해짐, 비동기화 등이 있다. 전기적 원인은 부분방전, 슬롯방전, 불평형 전압, 스위칭 썬지와 전력계통의 난조에 의해 발생하는 과도적인 응력(stress) 등이 있다[1]. 전기적 응력은 도체 모서리(corner) 부분에서 두 배 이상이며, 도체와 절연재료의 인접부분이 열화에 민감하기 때문에 가장 위험하다[2]. 환경적 원인은 도전성 물질, 습기, 먼지와 기름 등이 유입됨에 따라 절연열화 및 과피가 발생한다. 그리고 절연재료는 사용연수가 증가함에 따라 단분자화(depolymerization), 취성(brittleness)의 증가, 열적, 기계적, 전기적 및 환경적인 원인이 복합적으로 작용하여 마이카 테이프 내부 및 테이프 사이의 층간계면에서 박리(delamination), 공극(void) 및 균열(crack) 등이 발생되어 결합요소의 성장으로 인해 절연과피 되는 것으로 알려져 있다[3, 4].

본 논문에서는 장기간 운전된 대형 터빈발전기(정격전압 22kV) 고정자 권선에서 절연과피로 인해 정지됨에 따라 원인을 분석하기 위해 캐패시턴스와 유전정점을 측정하였다. 또한, 절연과피된 고정자 권선의 인접부분과 건전부분에서 시편을 절출하였다. 미시적 관찰을 위해 6개 시편의 단면을 주사형 전자현미경

3. 시험결과 및 고찰

3.1 캐패시턴스 및 유전정점 분석

대형 터빈발전기 고정자 권선에서 절연과피된 바(bar)의 열화상태를 분석하기 위해 캐패시턴스(capacitance)와 유전정점($\tan \delta$)을 분석하였다. 그림 1은 고정자 권선 바의 위치별로 절연열화 정도를 확인하기 위해 절연과피 인접 부분을 포함하여 6개 영역으로 분류하여 나타냈다.

그림 2는 실제 발전기 고정자 권선에서 절연과피 사진을 나타냈다. 그림 2(a)는 발전기 고정자 권선의 B상 상부(top) 권선의 하단에서 절연과피가 발생하였다. 그림 2(b)는 과피가 발생된 권선을 인출하여 절연과피부분을 나타냈으며, 실제로 절연과피 발생의 근원점은 왼쪽으로 2~3cm 떨어져 있었다. 도체와 마이카 테이프 사이에서 방전 발생 즉, 도체표면에서 방전으로 판단된다[5]. 이러한 방전 발생 개시점의 도체 표면이 직경 2mm 정도 크기의 구멍이 생성되었다. 절연과피 부분에서 마이카 테이프를 한겹씩 분리하면서 내부를 관찰한 결과 부분방전 발생으로 인해 층간계면과 마이카 테이프에서 탄화 흔적을 볼 수 있었다. 실제로 절연과피 부분을 세밀하게 분석하여 종합한 결과 절연과피 경로가 이미 발표된 논문[6]과 일치하였다.

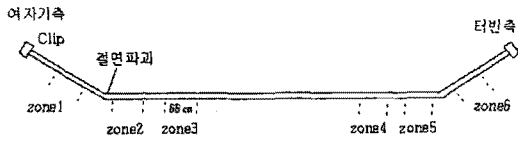
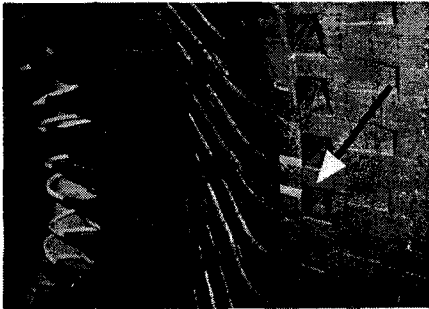


그림 1. 발전기 고정자 권선의 분류



(a) 고정자 권선의 절연과피 위치



(b) 절연과피 권선의 상태

그림 2. 발전기 고정자 권선의 절연과피

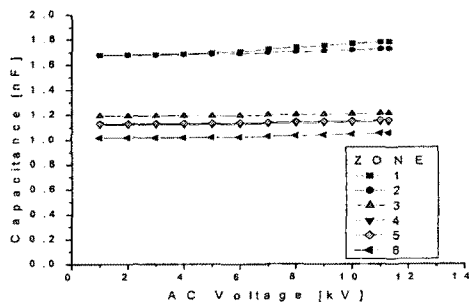


그림 3. 캐패시턴스-교류전압의 특성

먼저 절연물이 흡습되었을 때 나타나는 유전율의 변화에 따라 캐패시턴스 증가를 파악하기 위해 그림 3과 같이 6개 영역에서 캐패시턴스와 교류전압 사이의 관계를 나타냈다. 영역 1, 2, 영역 3-6의 캐패시턴

스가 유사하게 측정되었고 교류전압 증가에 따라 캐패시턴스가 일정하게 나타났다.

또한, 절연물이 흡습되면 에폭시 수지의 분해에 따라 미세 공극 발생과 마이카 테이프 사이의 층간계면에서 박리되는 현상이 나타남으로 근본적인 원인을 규명하기 위해 유전정접($\tan \delta$)을 측정하였다. 그림 4는 6개 영역에서 유전정접과 교류전압 사이의 관계를 나타냈다. 영역 1, 2, 영역 3-6의 유전정접이 유사하게 측정되었고 교류전압 증가에 따라 유전정접도 증가하고 있다. 따라서 영역 1, 2의 캐패시턴스와 유전정접이 영역 3-6에 비해 높게 분석되기 때문에 그림 1에서 나타낸 바와 같이 절연과피 인접 부분이 다른 부분에 비해 흡습 가능성이 높게 나타났다.

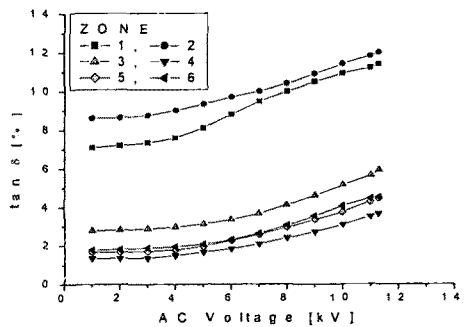


그림 4. $\tan \delta$ -교류전압의 특성

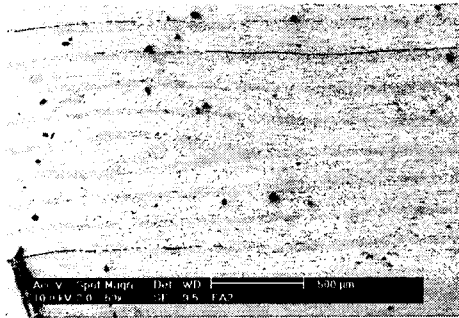
3.2 SEM 분석

그림 5는 발전기 고정자 권선에서 절연과피 인접부분의 영역 1, 2와 영역 3-6에서 절출한 시편의 SEM 사진을 나타내었으며, 옅은 회색은 마이카이고 짙은 회색은 에폭시 수지를 나타낸다. 에폭시 수지가 마이카 테이프 사이의 층간계면에 많이 분포되어 있다. 따라서 발전기 고정자 권선이 열적 열화를 받게 되면, 층간계면에서 박리와 공극 등이 발생한다[6]. 또한, 발전기 고정자 권선이 운전중에 열적 및 기계적 열화를 받을 경우 마이카 테이프 사이의 층간계면 뿐만 아니라 마이카 크리스탈(crystal) 내부에서도 박리가 생성될 수 있다[7].

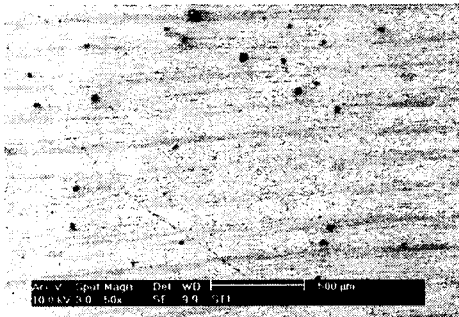
그림 5(a)에서 알 수 있는 바와 같이 영역 1, 2는 마이카 테이프 사이의 층간계면에서 박리가 발생됨에 따라 열적 및 기계적 열화를 받은 것으로 판단된다. 이러한 층간계면의 박리 발생은 그림 3과 그림 4에서 설명한 바와 같이 캐패시턴스와 유전정접의 증가와 상호 연관성이 있는 것으로 판단할 수 있다. 그러나 그림 5(b)에서 나타낸 바와 같이 영역 3-6은 마이카 테이프 사이의 층간계면에서는 거의 박리 현상을 발견할 수 없기 때문에 열적 및 기계적 열화를 받지 않는 것으로 판단된다. 영역 1, 2에 비해 영역 3-6에서는 박리 현상이 거의 발생하지 않아서 캐패시턴스와 유전정접이 감소한 것으로 판단된다.

따라서 발전기 고정자 권선의 절연과피 원인은 최초로 도체표면에서 방전 발생으로 마이카 테이프의 절연열화가 계속적으로 진전되면서 열적 및 기계적 열화로 인한 층간계면의 분리가 주요한 요소로 작용

한 것으로 판정된다. 절연재료 내부에서 절연열화가 개시되어 절연파괴가 '발생되기까지는 수년 혹은 수십년이 소요된다.



(a) 영역 1, 2



(b) 영역 3-6

그림 5. 발전기 고정자 권선에서 SEM 사진

4. 결 론

마이카 테이프를 주절연으로 사용하는 대형 터빈발전기(정격전압 22kV) 고정자 권선을 6개 영역으로 분류하여 캐패시턴스와 유전정접을 분석하였다. 절연파괴 원인 분석을 위해 주사형 전자현미경을 사용하여 미세구조를 관찰한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 영역 1, 2와 영역 3-6의 캐패시턴스와 유전정접이 유사하게 측정되었고 교류전압 증가에 따라 각각의 크기도 증가하였다. 또한, 영역 1, 2의 캐패시턴스와 유전정접이 영역 3-6에 비해 높게 분석되기 때문에 절연파괴 인접 부분이 다른 부분에 비해 층간계면에서 박리 발생의 가능성을 예측할 수 있었다.

(2) SEM 사진을 분석한 결과 고정자 권선에서 영역 1, 2는 열적 및 기계적 열화로 인해 마이카 테이프 사이의 층간계면에서 박리가 발생하였다. 그러나 영역 3-6에서는 거의 박리가 발생되지 않았기 때문에 영역 1, 2에 비해 캐패시턴스와 유전정접이 감소한 것으로 판단할 수 있었다.

(3) 발전기 고정자 권선의 절연파괴 원인은 최초로

도체표면에서 방전 발생으로 마이카 테이프의 절연열화가 지속적으로 진전되면서 열적 및 기계적 열화로 인한 층간계면의 분리로 인해 가속화된 것으로 판정되었다.

(참 고 문 헌)

[1] O. M. Nassar, "Effect of Surge Wave Reflection Inside a Motor on Voltage Distribution Across Stator Windings", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-104, No. 4, pp. 882-889, 1985.

[2] R. H. Rehder, R. E. Draper and B. J. Moore, "How Good is Your Motor Insulation System?", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 12, No. 4, pp. 8-13, 1996.

[3] G. C. Stone et al, "Investigation of Turn Insulation Failures Mechanisms in Large AC Motors", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-103, No. 9, pp. 2588-2593, 1984.

[4] 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.

[5] 김희동, 이영준, 주영호, "수력발전기 고정자 권선의 운전중 부분방전 분석", 대한전기학회 고전압 및 방전응용기술/전기재료 연구회 춘계학술대회, pp. 62-64, 2002.

[6] 김희동, "발전기 고정자 권선의 절연열화 메카니즘 분석", 전기전자재료학회논문지, Vol. 15, No. 2, pp. 119-126, 2002.

[7] K. Kimura and Y. Kaneda, "The Role of Microscope Defects in Multistress Aging of Micaceous Insulation", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 3, pp. 426-432, 1995.