

고압전동기 고정자 권선 절연재료의 미세구조 특성 Microstructure Property of High Voltage Motor Stator Insulation

김희동 한전 전력연구원
주영호 한전 전력연구원

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

Abstract

High voltage motor(rated 6.6kV and 448kW) has failed in the stator endwinding area during normal service. Experiments on microstructure property were conducted using the control and aged insulations, which were drawn out from stator windings of the high voltage motor. The analyses were characterized using stereozoom microscope(SM), scanning electron microscope(SEM) and energy dispersive X-ray spectroscopy(EDS). SM result shows that large voids are present in the interface between turn insulation and groundwall insulation. SEM results indicated that the groundwall insulation is rarely thermal stress. EDS results showed that chemical elements in the high voltage motor stator insulations were Al, Si, O, K and Fe.

1. 서론

고압전동기 고정자 권선의 주절연재료로 마이카 테이프가 사용되고 있으며, 이는 실제 운전 중에 열적, 기계적, 전기적 및 환경적인 원인에 의해 절연열화가 진행된다. 열적 원인은 과부하, 주기적인 기동 정지, 소선절연(strand insulation)의 손상, 마이카 테이프의 분리 등에 의해 일어나고, 기계적 원인은 진동, 췌지(wedge)와 권선 매듭(tie)의 느슨해짐, 비동기화 등이 있다. 전기적 원인은 부분방전, 슬롯방전, 불평형 전압, 스위칭 서지와 전력계통의 난조에 의해 발생하는 과도적인 응력(stress) 등이 있다[1]. 전기적 응력은 도체 모서리(corner) 부분에서 두배 이상이며, 도체와 절연재료의 인접부분이 열화에 민감하기 때문에 가장 위험하다[2]. 환경적 원인은 도전성 물질, 습기, 먼지와 기름 등이 유입됨에 따라 절연열화 및 파괴가 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 균열(crack), 공극(void) 및 박리(delamination) 등이 확장되어 절연파괴 되는 것으로 알려져있다[3, 4]. 10년 이상 사용된 고압전동기에서 절연열화와 흡습에 의한 환경적 원인의 영향으로 인해 사고

가 증가하고 있는데, 이를 분석한 결과 절연열화 및 환경에 의한 사고가 전체중에 77%를 차지하고 있다. 또한, 고압전동기는 기동중에 발생하는 사고가 24%이며, 대부분(62%)은 정상 운전중에 고장이 돌발적으로 발생하여 손상(damage) 정도가 커서 단시간에 복구가 곤란할 뿐만 아니라 상대적으로 복구비용이 크다. 따라서 일본, 미국에서도 고압전동기의 고장방지에 대한 관심이 대단히 높기 때문에 고장예방을 위한 기술개발에 지속적인 노력을 하고 있다. 일본에서 3kV급 유도전동기 125대의 고장원인 중에 고정자 권선(46.4%), 회전자(9.6%), 축수(28.8%), 기타(15.2%) 등으로 나타났으며, 미국 EPRI는 정격전압이 2.3kV 이상의 대용량 전동기가 설치되어 운전중인 발전소에서 7500대를 조사한 결과, 37%는 고정자 권선에서 절연파괴가 발생한 것으로 발표하였다[5].

운전중인 고압전동기(정격전압 6.6kV, 448kW) 고정자 권선의 단말부분(endwinding)에서 절연파괴로 인해 정지됨에 따라 원인을 규명하기 위해 파괴 인접부분에서 시편을 절출하였다. 미시적 관찰을 위해 시편의 단면을 저배율 입체현미경(Stereozoom Microscope)과 주사형 전자현미경(Scanning Electron Microscope : SEM)을 사용

하였으며, 화학적 원소 분석을 위해 분산형 X선 분광장치(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy : EDS)로 분석하였다.

2. 실험방법

본 논문에서는 고압전동기(정격전압 6.6kV, 448kW) 고정자 권선이 절연파괴로 인해 정지됨에 따라 원인을 규명하기 위해 파괴 인접부분에서 시편을 정밀절단기(ISOMET 2000)를 사용하여 절출하였다. 정밀절단기의 날형태(blade type)는 다이아몬드(diamond)를 사용하였으며, 속도는 2300rpm이다. 미시적 관찰을 위해 시편의 단면을 저배율 입체현미경(Stereozoom Microscope, Leica Wild M8)과 주사형 전자현미경(Scanning Electron Microscope, 일본 JEOL, JSM-6400)을 이용하였으며, 화학적 원소 분석을 위해 분산형 X선 분광장치(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, Oxford, eXLII)로 관찰하였다.

3. 고정자 권선의 구조

고압전동기 고정자 권선의 단면도는 그림 1에서 보인 바와 같이 슬롯에 들어가는 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 결합재를 혼합하여 테이프 형태로 제작된 마이카 테이프를 사용한다. 결합재

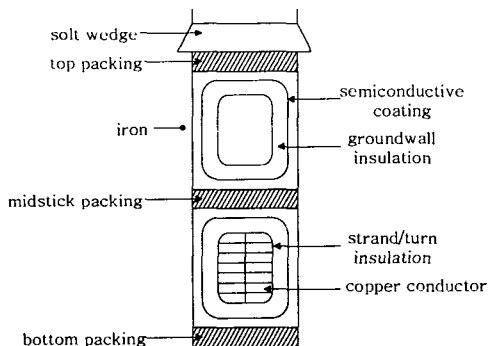


그림 1. 고정자 권선의 단면도

는 폴리에스터(polyester)와 에폭시(epoxy) 수지로 분류되는데, 습기와 화학 성분에 대한 내구성, 기계적 및 절연특성이 우수하여 대부분의 고압전동기 제작 업체가 이를 사용하고 있다. 고정자 권선의 함침방식은 진공가압함침(vacuum pressure impregnation) 방식을 사용하며, 절연재료와 권선 제조기술의 진보에 따라 대용량화, 고압화, 소형경량화 등이 이루어져 최근 절연계급도 F종으로 제작되고 있다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 절연파괴 원인 분석[3, 4]

고압전동기는 운전중에 부하측 C상 단말권선에서 절연파괴가 발생 되었으며, 기기이력은 5년동안 25,760 hr 정도 운전하였다. 고압전동기의 슬롯수는 72개이고 고정자 권선은 Y결선이며, 권선수는 12회로 구성되었다. 그림 2(a)는 고정자 단말권선의 절연파괴 부분을 나타냈으며, 그림 2(b)는 저배율 입체현미경을 사용하여 파괴부분을 확대하였다. 그림 2(b)에서 보인 바와 같이 절연파괴시 아크(arc) 열에 의해 동도체와 주절연이 녹았으며, 절연파괴 원인은 턴절연의 손상에 의해 주절연이 파괴되었음을 추정할 수 있었다.

그림 3(a)은 절연파괴가 발생한 고정자 단말권선의 인접부분에서 정밀절단기를 사용하여 절출한 권선의 단면을 저배율 입체현미경을 사용하여 세밀하게 관찰한 결과 턴절연과 주절연 사이의 경계 부분에서 많은 보이드가 발견되었다. 이와같이 주절연과 턴절연의 분리는 권선작업 동안에 물리적 변형(physical distortion)의 결과로서 나타나며, 초기 보이드는 함침 수지의 불완전한 충전

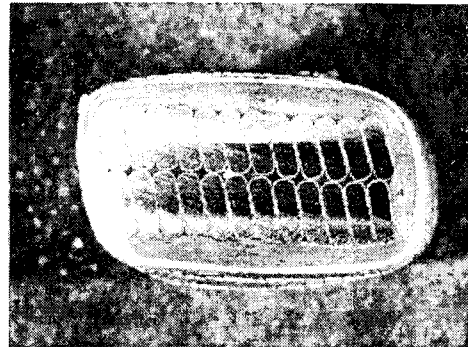


(a) 절연파괴



(b) 파괴부분의 확대

그림 2. 고정자 단말권선의 절연파괴

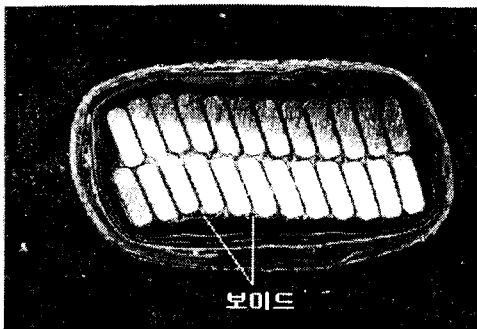


(b) 건전권선

그림 3. 고정자 단말권선의 단면

혹은 불안정한 경화에 의해 생성된다. 또한, 보이는 턴절연과 주절연 사이의 결합력이 감소함에 따라 고압전동기 운전중에도 발생한다. 그리고 동도체는 24개의 소선으로 구성되어 있으며, 동도체 배열이 균일하게 정렬되지 않은 것은 고정자 권선을 제작하여 슬롯에 설치한 후에 진공함침시 슬롯부분에 비해 상대적으로 취약한 단말권선에서 변형된 것으로 판단된다. 이와같은 고정자 권선은 제작될 때부터 결합을 갖고 있었으며, 전기적 및 기계적인 복합응력이 가해짐에 따라 가장 열악한 권선에서 절연파괴가 발생된 것으로 사료된다. 그림 3(b)는 절연파괴가 발생한 권선에서 직선바(straight bar)쪽으로 10cm 정도 떨어져 있는 부분에서 절출한 시편이며, 그림 3(a)에 비해 보이드도 거의 존재하지 않고 동도체 배열도 양호하다.

고압전동기의 절연파괴 메카니즘은 크게 열적, 기계적 및 전기적인 복합열화로 인해 결합부분에서 부분방전 발생과 환경적 및 전기적인 복합열화에 의한 파괴로 분류할 수 있다. 턴절연은 각각의 턴이 서로 접촉하는 것을 방지하도록 얇게 절연되어 있으며, 턴과 턴 사이의 전압이 정상적인 운전상태에서는 단지 수십 볼트 정도이다. 그러나 턴절연과 주절연 사이의 경계(interface)에서 보이드와 결합이 제작불량과 장기간 운전에 따른 열적 및 기계적 복합응력에 의해 발생되고, 이부분에서 전기적 응력(stress)이 충분히 크게 인가될 때 부분방전을 일으킨다. 부분방전은 턴절연재료에서 침식(erosion)을 생성하고 턴과 턴 사이의 단락을 발생시켜 절연재료가 급격하게 열화된다. 주절연재료에서는 수년동안 이들 부분방전을 견딜 수 있지만, 얇은 턴절연재료는 내부분방전성이 작기 때문에 상대적으로 짧은 시간에 열화로 인해 분해된다. 따라서 정상적인 운전전압에서 인접한 턴사이의 절연이 약화됨에 따라 턴이 단락되고 과열로 인해 절연파괴가 발생한다. 직선바 표면에서 오염은 고정자 철심이 접지에 효과적으로 연결되어 전계에 대한 영향이 미약하다. 그러나 단말권선 표면은 운전중에 축적된 오염, 먼지, 기름 등으로 인해 미세하게 도전성을 갖고 있으며, 절연재료 내부에서 전계강도(electrical field intensity)가 증가하여 턴사이의 절연재료(interturn insulation)가 파괴된다.

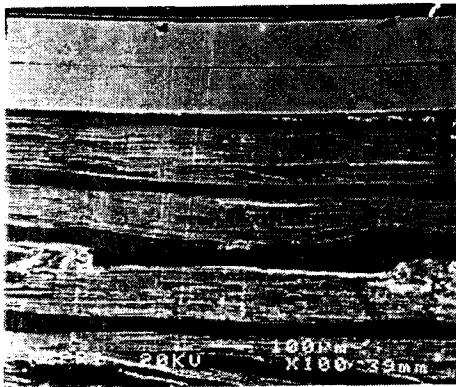


(a) 열화권선

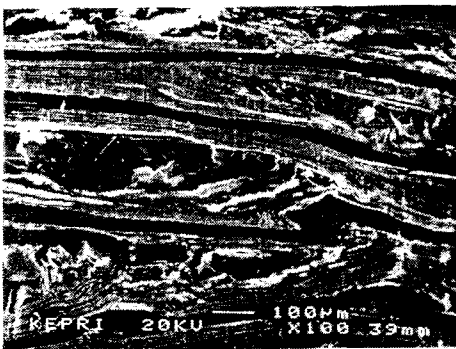
4.2 SEM 및 EDS 분석

그림 4는 절연파괴된 단말권선 주절연의 건전과 열화 부분에서 절출한 시편의 SEM 사진을 나

타냈으며, 옅은 회색은 마이카이고 짙은 회색은 에폭시를 나타낸다. 그림 4(a), (b)에서 알 수 있는 바와 같이 건전시편과 열화시편에서는 마이카/에폭시 테이프 사이의 계면에서 거의 보이드를 발견할 수 없기 때문에 열적 열화를 받지 않는 것으로 판단된다. 그림 4(a)의 건전시편은 마이카 테이프 내부에서 보이드가 거의 나타나지 않았으며, 테이프 층이 균일하게 배열되어 있다. 그러나 (b)의 열화시편은 마이카 테이프 내부에서 보이드가 많이 존재하며, 테이프 층의 배열상태가 불균일하다. 따라서 마이카 테이프 내부에서 보이드들은 절연파괴시에 전기적 응력에 의해 주로 발생된 것으로 사료된다.



(a) 건전시편



(b) 열화시편

그림 4. 고정자 단말권선의 SEM 사진

그림 5는 고정자 단말권선에서 EDS를 사용하여 화학적 원소를 분석한 결과 Al, Si, O, K, Fe, Au 등이 나타났으며, 여기서 Au는 SEM 관찰을 위해 시편을 금으로 증착시켰기 때문에 나타난

것으로 판단된다. Al, Si, O, K, Fe 등이 나타나는 것으로 보아 백마이카(muscovite mica)를 사용하고 있음을 알 수 있었다.

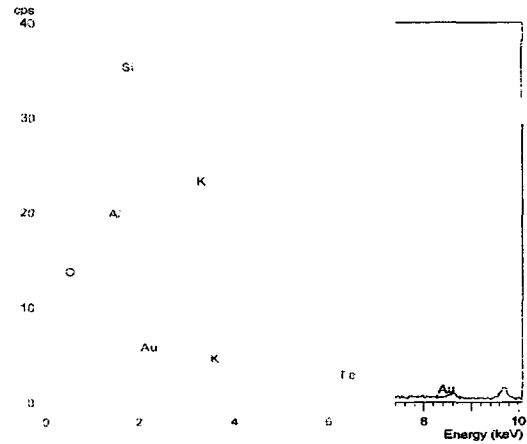


그림 5. 고정자 단말권선의 EDS 분석

5. 결론

마이카 테이프를 주절연으로 사용하는 고압전동기(정격전압 6.6kV, 448kW) 고정자 권선의 단말권선에서 절출한 시편의 미세구조를 분석하였다. 미세적 관찰과 화학적 원소 분석을 위해 각각 저배율 입체현미경, 주사형 전자현미경과 분산형 X선 분광장치를 사용하여 특성을 관찰한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 고정자 권선 작업동안에 물리적 변형의 결과로서 주절연과 턴절연 사이의 경계에서 보이드가 나타났으며, 보이드와 결합부분에서 부분방전이 발생하여 턴절연재료를 침식시키고 턴과 턴 사이의 단락으로 인해 절연파괴가 발생하였다.

(2) SEM 사진을 분석한 결과 고정자 단말권선의 주절연재료는 열적 열화를 거의 받지 않았으며, 열화시편의 마이카 테이프 내부에서 보이드는 절연파괴시에 전기적 응력에 의해 주로 발생된 것을 확인하였다.

(3) EDS를 사용하여 화학적 원소를 분석한 결과 Al, Si, O, K, Fe 등이 나타나는 것으로 보아 고정자 권선의 주절연재료로 사용된 마이카 테이프가 백마이카(muscovite mica)임을 확인할 수 있었다.

참고문헌

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. G. C. Stone, B. A. Lloyd and S. R. Campbell, "On-Line Monitoring for Condition Assessment of Motor and Generator Stator Windings", IEEE Pulp and Paper Industry Technical Conference, pp. 94-103, 1994.