

회전기 고정자 권선에서 절연재료의 특성

Properties of Insulation System in Rotating Machine Stator Windings

박종정 전력연구원

김희동 전력연구원

김희곤 전력연구원

강도열 홍익대학교 공대 전자전기공학부

한상옥 충남대학교 공대 전기공학과

Jong Jeong Park Korea Electric Power Research Institute

Hee Dong Kim Korea Electric Power Research Institute

Hee Gon Kim Korea Electric Power Research Institute

Dou Yoi Kang School of Electronics & Electrical Eng, Hong Ik University

Sang Ok Han Dept. of Elect. Eng. Chungnam Nat'l University

Abstract

The surface of mica/epoxy paper(130 μ m) is investigated with SEM(scanning electron microscope). SEM micrographs revealed that thermal aging has a strong influence on aged specimens. The mica/epoxy paper was exposed at 180 $^{\circ}$ C in an ordinary electrical oven for 72hour. Stator windings from two generators were measured by tan delta(tan δ)and maximum partial discharge(Qm). The values of tan δ and Qm were found to be higher for new generator than old one. The insulation condition of mica/epoxy paper were measured by ac current and tan δ . Test results are observed that the sound specimens are higher than those aged. Model bar coils subjected to various accelerated agings were evaluated by Qm.

1. 서론

고압회전기 고정자 권선의 절연 구성은 소선절연(strand insulation), 턴절연(turn insulation)및 주절연(groundwall insulation)으로 나눌 수 있으며, 절연재료는 마이카(mica)에 결합재(bonding material)와 보강재(backing material)를 혼합하여 테이프 형태로 제작된다.¹⁾ 마이카는 유기 고분자 재료에 비하여 현저한 내 부분방전성을 갖고 있으므로 주로 절연기능을 하고 결합재는 마이카를 서로 접착시키는 역할을 하며, 보강재는 기계장치를 이용하여 마이카 테이프를 동바(copper bar)에 감을때 테이프의 장력을 유지시켜 작업을 원활하게 한다.

1970년대 초반까지 마이카는 조각이 큰 마이카 프레이크(flake)가 사용되었으나, 경계면에서 불균등한 전계를 형성하기 때문에 균일한 특성을 갖는 제품의 생산이 어려웠다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 생산 공정이 간단하고 특성이 균일한 마이카/에폭시 페이퍼(paper)가 1978년 GE(General Electric)에 의하여 개발되었다.²⁾

본 연구는 마이카/에폭시 페이퍼의 건전시편과 열

화시편의 교류전류와 유전정점을 측정하였고, 실제 운전중 및 운전예정인 신규화력 발전기 고정자 권선의 유전정점과 부분방전을 측정하였다. 또한 수소 냉각식 화력용 발전기(정격전압 22kV, 500MW) 고정자 권선을 모의로 제작하여 실험실적 가속열화 시험중에 주기적으로 부분방전량을 관찰하였다.

2. 실험방법

마이카/에폭시 페이퍼(130 μ m)의 건전시편과 열화시편 표면을 SEM(일본, JEOL사, JSM 5410)으로 관찰하였다. 마이카/에폭시의 건전시편과 열화시편을 은(Ag)으로 진공증착해서 Schering Bridge (Tettex Instruments사, Type 2818 QA)를 이용하여 교류전류와 유전정점을 측정하였으며, 시편 열화를 위해 180 $^{\circ}$ C의 전기로에서 72시간 동안 열화시켰다. 또한 마이카/에폭시를 주절연재료로 사용하는 수소 냉각식 화력용 발전기(정격전압 22kV, 500MW) 고정자 권선을 제작하여 공기중에서 420Hz, 27.5kV전압을 인가하여 실험실에서 가속열화시험 중에 주기

적으로 4개의 권선, 실제 운전중(16개월) 및 운전 예정인 발전기에 대하여 부분방전 측정기(Partial Discharge Detector Tettex Instruments사, Type 9124)를 이용하여 부분방전량을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

표 1은 500MW급 표준화력 발전기 사양을 나타낸다.

표 1. 표준화력 발전기(500MW) 사양

정격용량	560MVA	상수	3상
회전수	3,600rpm	주파수	60Hz
정격(단자)전압	22kV	극수	2극
정격(상) 전류	16,016A	역율	0.9
절연종류	마이카/에폭시	절연계급	F종 (수냉각)

3.1 SEM 분석

그림 1과 2는 마이카/에폭시의 건전시편과 열화시편의 SEM 사진이다. 건전시편에서는 마이카의 층상구조가 명확하게 보이지만 열화시편은 에폭시가 적절하게 녹아 마이카와 에폭시 계면이 단일층으로 되어있는 것을 볼 수 있다.



그림 1. 마이카/에폭시 건전시편의 SEM 사진

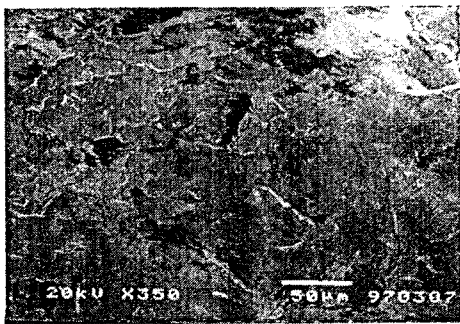


그림 2. 마이카/에폭시 열화시편의 SEM 사진

3.2 교류 전류시험(AC Current Test)

교류 전류시험은 절연물에 교류전압을 인가하였을 때 흐르는 전압-전류와의 관계 즉 I-V특성으로 부터 절연상태를 평가하기 위한 시험이다. 교류전압을 절연물에 인가하면 전압 상승에 비례하여 충전전류가 증가하며 이때 절연층내의 결함(미소공극: void)이 존재하여 부분방전 현상이 발생하게 되어 미소공극을 단락시키므로 충전전류는 급격이 증가하게 된다.

그림 3은 건전시편과 열화시편에서 전류-전압 특성을 나타냈는데, 건전시편 보다 열화된 시편에서 전류가 감소하는 것으로 보아 에폭시 수지의 분자사이에 가교(cross-linking) 반응을 일으켜 마이카와 에폭시 사이의 계면이 견고해져 전류가 감소한 것으로 사료된다. 일반적으로 고분자가 가교되면 절연 파괴 강도가 증가하는 것으로 알려졌다.³⁾

발전기 고정자 권선 제작시에도 에폭시가 적층된 페이퍼 사이에 잘 스며들어 미소공극이 발생하지 않도록 온도를 150~160℃에서 1,200 PSIG 압력을 인가하여 30분 동안 유지한다. 에폭시 수지가 충분히 경화(cure)되면, 운전 범위를 초과하여 유리전이 온도(glass transition temperature : Tg)부분에서 강한 결합력을 갖는다.⁴⁾

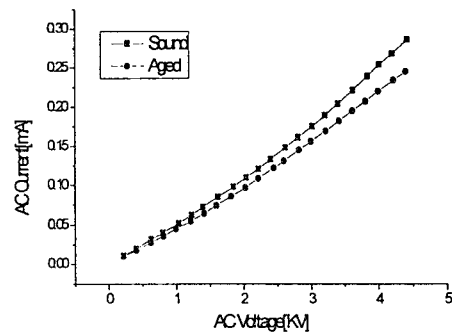


그림 3. 건전 및 열화시편의 전류-전압 특성

교류 전류시험의 전류-전압 특성에 있어서 절연 진단에 사용되는 파라메타는 식(1)과 같이 전류증가율(ΔI)을 계산한다.

$$\Delta I = \frac{I - I_0}{I_0} \times 100\% \quad (1)$$

여기서 I : 정격상전압(E) 인가시 흐르는 전류

I_0 : 전류가 직선적으로 증가한다고 가정할 경우 정격전압에서의 전류

식(1)에 의해 건전과 열화시편 사이의 ΔI 계산결과 각각 2.89%와 2.31%로 나타났으며, 건전시편이 0.58% 높게 나타났다.

3.3 유전정접($\tan \delta$)

유전체 절연물에 교류전류를 가할때는 일반적으로 누설전류, 유전분극 및 부분방전 등에 의한 유전손(dielectric loss)이라는 에너지 손실이 발생하고, 이를 나타내는 척도로써 유전정접($\tan \delta$)을 사용하고 있다. 따라서 절연체에 교류전압을 인가하여 $\tan \delta$ -전압 특성을 측정하므로써 흡습, 건조, 오손, 미소공극 유무 등의 절연상태 및 열화정도를 추정하는 시험을 유전정접($\tan \delta$)시험 이라한다.

그림 4와 그림 5는 1년 6개월 동안 운전한 발전기 고정자 권선 및 운전 예정인 신규 발전기 고정자 권선의 $\tan \delta$ -전압 특성을 나타냈는데, 운전하지 않은 발전기 고정자 권선이 운전중인 발전기 보다 유전정접이 높게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있었다. 이런 결과는 275kV급 OF 케이블의 유전정접 특성 과도 일치한다.⁵⁾ 그림 6은 마이카/에폭시 페이퍼에서 건전시편과 열화시편의 $\tan \delta$ -전압 특성을 나타냈는데, 역시 열화시편이 건전시편 보다 낮게 나타

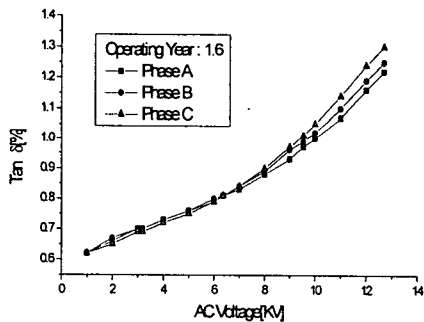


그림 4. 운전중인 발전기 $\tan \delta$ -전압 특성

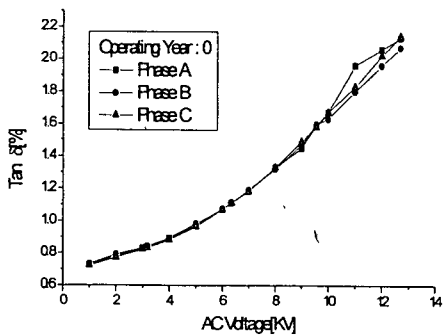


그림 5. 신규 발전기 $\tan \delta$ -전압 특성

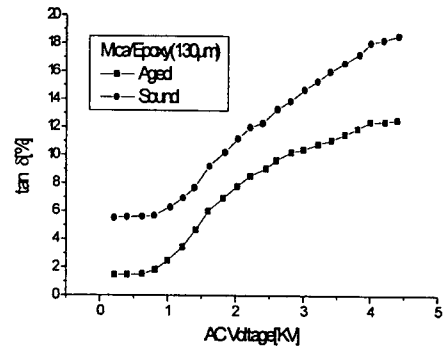


그림 6. 건전과 열화시편의 $\tan \delta$ -전압 특성

3.4 부분방전(Partial Discharge)

회전기 고정자 권선의 열화상태를 평가하기 위하여 취급되는 중요한 파라메타로서 절연물의 미소공극에서 발생하는 부분방전의 최대값을 측정하여 그 절대값 또는 변화 추이를 분석하여 절연 상태를 평가하는 것으로 현재까지 가장 신뢰성 있는 것으로 인정되고 있다.

표 2는 운전중 및 운전 예정인 신규 발전기에서 부분방전량을 측정된 결과이다. 운전예정인 신규 발전기에 비하여 1년 6개월 동안 운전된 발전기의 부분방전량이 낮게 나타나고 있다. 이런 이유는 신규 발전기에 비해 운전중인 발전기가 열적인 열화로 인해 에폭시가 녹아 마이카 사이의 계면에 잘 스며들어 미소공극을 줄이는 매개체 역할을 하여 부분방전량이 감소되는 것으로 사료된다.

표 2. 운전중 및 신규 발전기의 부분방전량

상호기	A상	B상	C상	비고
운전중	18,000	25,000	31,000	12.7kV에서 부분방전 전하량(pC)
신규	85,000	80,000	85,000	

그림 7은 실제 발전기와 동일한 고정자 권선에서 공기중 가속열화 중인 4개의 권선에서 주기적으로 부분방전량을 측정된 결과이며, 상기 언급한 바와 같이 초기 권선에서는 높게 나타나다가 686시간 까지 감소하고 있음을 알 수 있다. 다시 686시간 부터 2,864시간 까지 서서히 증가하다가 2,864시간 이후 부터 4,286시간 까지는 급격히 증가하고 있음을 확인할 수 있었다.

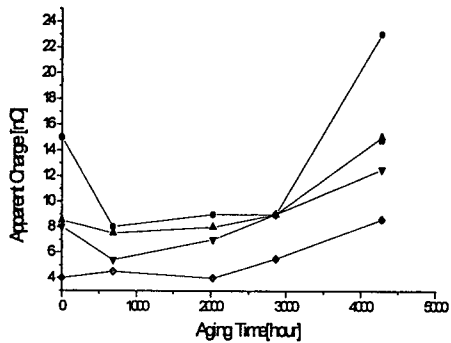


그림 7. 가속열화 권선의 부분방전량

4. 결론

마이카/에폭시 페이퍼의 건전시편과 열화시편에서 교류전류와 유전정접, 실제 운전중인 발전기 및 운전 예정인 신규 화력발전기의 유전정접과 부분방전을 측정하고, 수소 냉각식 화력용 발전기(정격전압 22kV, 500MW)고정자 권선을 제작하여 가속열화 중에 주기적으로 부분방전량을 측정된 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) SEM 관찰 결과 건전시편에서는 마이카의 층상 구조가 명확하게 보이지만, 열화시편은 에폭시가 적절하게 녹아 마이카와 에폭시 계면이 단일상으로 되어있는 것을 볼 수 있었다.

(2) 마이카/에폭시의 건전시편 보다 열화시편에서 교류전류와 유전정접이 낮게 나타난 것은 에폭시에서 가교반응이 일어나 마이카 사이의 계면이 견고하게 형성되는 것으로 판정되며, 열화시편보다 건전시편에서 전류 증가율이 높게 나타났다.

(3) 운전중인 발전기 및 운전 예정인 신규 발전기의 $\tan \delta$ -전압 특성을 분석한 결과 운전예정인 발전기 보다 운전중인 발전기의 유전정접이 낮게 나타남을 확인할 수 있었다.

(4) 공기중에서 가속열화시험 중인 4개의 권선을 주기적으로 부분방전량을 측정된 결과 초기 권선에서는 높게 나타났으나 686시간 까지 저하하다가 2,864시간 후에는 급격히 증가함을 확인 하였다.

참고문헌

- [1] I.M Culbert, H. Dhirani. G.C. Stone, " Handbook to assess the Insulation Condition of Large Rotating Machines", EPRI, EL-5036, Vol. 16, pp. 2-1~2-5, 1989.
- [2] N.V. Giaia C.V. Maughan and W.R. Schultz,

Jr., "A Second-Generation Epoxy-Mica-Paper Insulation System for Large Turbine Generator-Stator-Windings", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-97, No. 1, pp. 125-133, 1978.

- [3] 大木正路, 고전압공학, 槇書店, 1980. p 174.
- [4] Spencer Chew and Andrew Sim, "Monitoring Partially-Cured Epoxy Adhesives in Disk-Drive Sub-Assembly by Thermal Analysis Techniques", IEEE 5th IPFA, pp. 181-188, 1995.
- [5] 전민호, 고전압시험, 한국전력공사, 1991, pp. 60-61..