

# 발전기 고장자 권선의 부분방전 특성을 이용한 절연진단 연구

강동식\*, 김용주\*, 김길용\*\*

한국전기연구소\*, 한전기술연구원\*\*

## A Study on Insulation Diagnosis by Partial Discharge Spectroscopy of Generator Stator Winding

D.S.Kang\*, Y.J.Kim\*, K.Y.Kim\*\*

Korea Electrotechnology Research Institute\*, KEPCO\*\*

### Abstract

Mica, which have a good thermal and electrical characteristics, while will cleave easily at these layers. In order to bond mica materials solidly, mica/epoxy composite insulation materials were developed for generator stator winding.

There are lots of problems such as delamination and partial discharge of these insulation materials caused by mechanical, electrical and thermal aging. Several experiments have been conducted in order to find the useful diagnostic parameters from the partial discharge phenomena by applying a new measurement techniques.

This paper deals with the partial discharge pulse characteristics, which may be a useful diagnostic concept in predicting insulation condition of generator stator insulation materials. Long term insulation aging test shows that partial discharge phase angle and magnitude are identified as one of the main key techniques for insulation diagnosis on generator stator winding.

### 1. 서론

Mica는 전기적, 기계적 및 열적 특성이 우수한 절연재료이지만 쉽게 층간 분리되는 성질 및 단일체로서 균질하고 큰 절연층을 만들기 어려운 관계로 수지와 복합된 절연재료의 개발이 이루어져왔다. 최근 mica의 우수한 성능을 충분히 이용하기 위한 기술의 진보에 따라 mica flake에 epoxy 수지를 첨가한 mica/epoxy 복합 절연재료가 발전기용 고장자 권선의 주종을 이루고 있다.<sup>1), 4)</sup>

발전기 고장자 권선에 사용되는 mica/epoxy 복합 절연물은 일반 절연물에서 일어나는 산화현상 등과 같은 화학적·열적열화 요인 및 절연재료의 제작중 포함된 미세 기포(void)에 의한 부분방전 열화현상이 나타난다. 또한 에폭시와 마이카의 계면 접착 부분 및 마이카 층간의 박리(delamination) 현상에 의하여 부분방전 열화가 진전되는 전기적 열화요인, 기동정지시의 전자력과 운전중의 진동 및 부하전류의 변화에 따른 열 cycle에 의한 기계적 열화요인 및

여러가지 환경적 열화요인을 받고 있다.<sup>2), 3), 4)</sup>

본 연구에서는 발전기의 안전운전과 수명판단에 직접적으로 고장자 권선 절연재료의 각종 열화현상중 전기적 열화시 발생하는 내부 부분방전 특성을 파악하는데 그 목적이 있다. 이를 위하여 여러가지 부분방전 측정기법(부분방전 펄스 주파수 측정, 펄스 크기 측정, 펄스 발생간격 측정, 상용 부분방전 측정 및 유전정위 측정)을 적용하여 시료의 부분방전 특성을 파악하였다.

### 2. 시험장치 및 방법

본 연구에서 사용된 시료는 현재 발전기용 고장자 권선에 널리 이용되는 절연방식인 epoxy 수지에 mica flake로 만든 mica paper를 합성시킨 것으로 일본 Mitsubishi Electric Co.에서 제작하였으며, 그 구조 및 형상은 그림 1과 같고 절연 두께는 4.6 mm이며 정격전압은 18 kV이다.

본 연구에서는 발전기 고장자 권선의 복합 절연재료에서 열화를 촉진시키는 각종 열화요인 중 주열화 요인으로 판단되는 전기적 열화요인이 작용되게 하여 절연재료의 열화를 가속시켜 부분방전의 변화상태를 파악하고 적절한 열화 인자를 찾기 위한 가속열화 장치를 제작하였다. 시료에 있어서 열적 조건은 발전기 고장자 권선의 현장상태를 모의하는 것으로 하여, 시료 중앙 절연층 외측에 철재로 제작한 slot model을 고정시키고 시료 절연층의 온도가  $100 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지되도록 slot model 외부의 양쪽에 각각 220V/400W의 평판 heater를 부착하였다. 전기적 가속열화를 진행하기 위하여 권선단말부에 corona suppression paint(주성분: SiC)를 약 360 mm씩 도포하여 열연방전이 발생되지 않도록 준비된 상태에서 시료용 절연층의 정격전압(E: 18KV)의 2배에 해당하는 35KV의 전압을 교류 60 Hz로 연속 인가 하였다.

가속열화중 절연열화 상태를 주기적으로 측정하기 위하여 매 300시간의 가속열화 시점마다 측정을 하여 시험 data를 수집하였으며, 이를 위하여 구성된 측정시스템의 전체구성도는 그림 2와 같다. 측정항목은 부분방전의 주파수에 따른 특성 분석, 부분방전의 크기 및 발생량 분석, 부분방전의 발생위상의 변화분석 및 부분방전 펄스의 발생간격과 발생량 분석에 중점을 두었으며 또한 일반적 정위중 측정방법인 상용 부분 방전시험 및 유전정위 시험을 병행하여 비교 분석하였다.

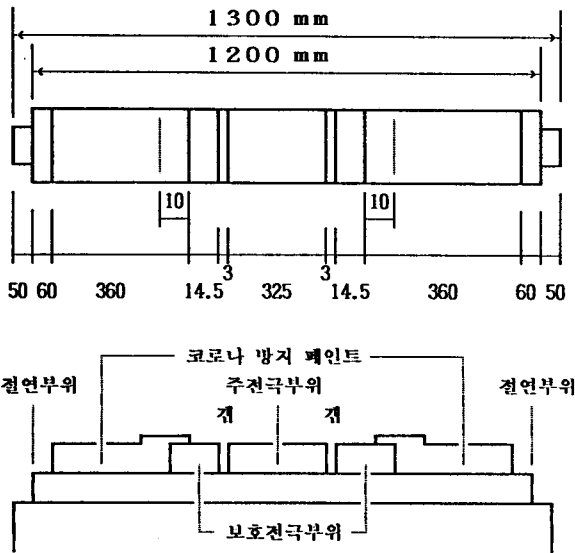


그림 1. 시험시료의 형상 및 표면 처리 상태

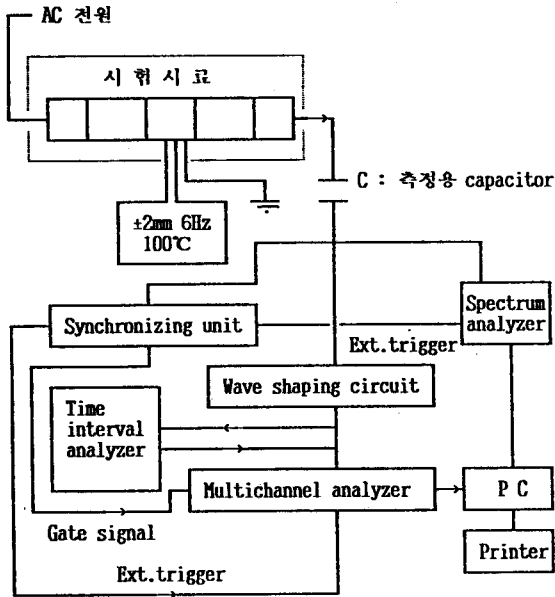


그림 2. 부분방전 측정 계통 흐름도

본 시험에 이용된 주 측정기기는 다음과 같다.

- 1) Spectrum Analyzer (HP, model 8560A)
- 2) Multichannel Analyzer (Canberra, model 35)
- 3) Time Interval Analyzer (Canberra, model 2120, 2145)
- 4) Normal PD Detector (Tettex, model 9124)
- 5) Schering Bridge (Tettex, model 2876)

### 3. 실험결과 및 분석

본 실험에서의 가속열화 시험조건, 시험진행 상태 및 전체 시료가 인가한 열화조건 하에서 파괴된 누적 가속열화 시간을 표 1에 나타내었다.

표 1. 가속열화 시험 상태

가속시험 차수	가속열화시간	전기적 가속 열화 및 열적 모의조건	누적가속열화시간
1차	0 시간	35KV, 100°C	0 시간
2차	300 시간	35KV, 100°C	300 시간
3차	300 시간	35KV, 100°C	600 시간
4차	300 시간	35KV, 100°C	900 시간
⋮	⋮	⋮	⋮
17차	300 시간	35KV, 100°C	4100 시간
18차	300 시간	35KV, 100°C	4400 시간
19차	300 시간	35KV, 100°C	4700 시간

11번 시료의 누적열화시간 : 2250 시간  
 12번 시료의 누적열화시간 : 3170 시간  
 13번 시료의 누적열화시간 : 3090 시간  
 14번 시료의 누적열화시간 : 4800 시간  
 15번 시료의 누적열화시간 : 4600 시간  
 16번 시료의 누적열화시간 : 4200 시간

실험이 완료된 후 전체 시료의 품질상태를 파악하기 위하여 각 시료에 있어서 파괴 발생시점의 누적 가속열화 시간으로 부터 전체 시료의 누적파괴 확율을 파악하기 위한 weibull 분포를 나타낸 것이 그림 3이다. Weibull 분포도에서 시료의 품질상태를 추정할 수 있는 형상 파라미터(m)를 구해본 결과 3.25로 나타났으며, 이는 시료 파괴율의 증가 수명에 따라 점증적으로 나타나는 형태로 볼 수 있으므로 시료의 품질상태도 양호하며 전체 시험결과의 통계적 처리도 가능한 것으로 보여진다.<sup>5)</sup>

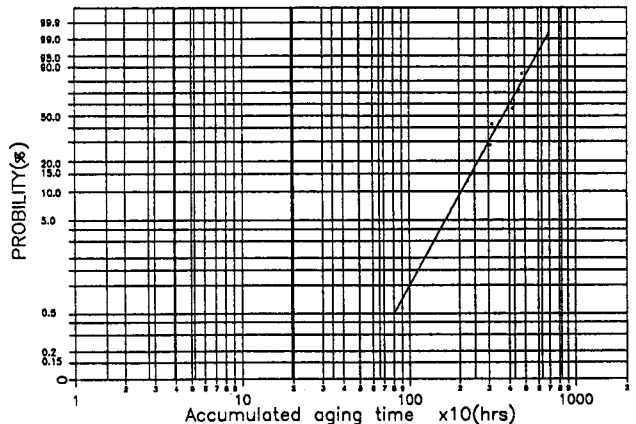


그림 3. 35kV 전압하에서 누적파괴 확률

### 3.1 주파수 분석결과

측정 주파수를 2, 5, 10, 15, 20 및 25MHz로 시험을 행하였으나 15 MHz 이상의 주파수 성분에서는 발생 부분방전 pulse의 크기 및 위상 분포의 변화추이가 잘 관측되지 않았지만 2, 5, 10MHz에서는 가속열화 시간에 따른 발생 부분방전 pulse의 변화경도가 크게 나타났다. 그림 4는 5MHz의 주파수 하에서 측정된 발생 부분방전 pulse의 크기와 위상 분포상태를 나타낸 것이다. 또한, 측정 주파수 5 MHz 조건에 있어서 발생 부분방전 펄스 최대크기 및 위상폭의 변화 추이를 파악하기 위하여, 각시료의 파괴발생 시점을 시료의 잔존수명 0 시간으로 두고 전체시료의 잔존수명 특성을 나타낸 것이 그림 5와 그림 6이다. 그림 5의 결과에서 누적 가속열화 시간의 증가(잔존수명 시간의 감소)에 따른 부분방전 최대크기는, 초기상태에서 2 mV 부근에서 시작하여 일정한 증가현상을 보이다 약 20 mV 이상 크기에 도달후 파괴된 것을 알 수 있다. 그림 6의 위상 특성 열화관련 분석 파라미터는 DIA(Dynamic Inception Angle : 부분방전 발생위상; 1 mV 이상의 부분방전이 나타나기 시작한 위상) 및 DEA(Dynamic Extinction Angle : 부분방전 소멸위상; 부분방전이 소멸하기전 1 mV의 부분방전이 나타난 위상)의 차인 부분방전 발생 위상폭(DIA - DEA)의 변화추이로서, 전반적으로 초기상태에서는 80° 근처의 발생 위상폭을 지나다가 발생위상폭이 110° 근처에 도달후 파괴된 것으로 나타났다.

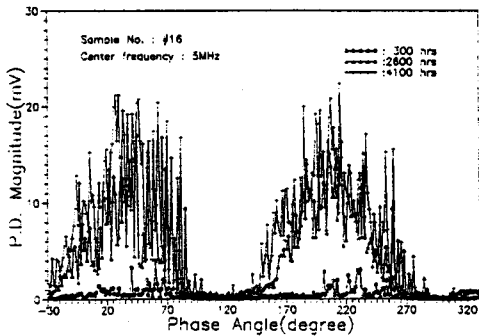


그림 4. 16번 시료의 주파수 특성 분포 (10.4kV)

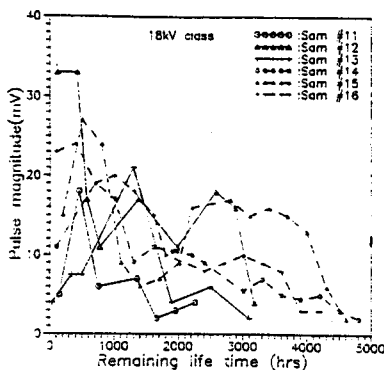


그림 5. 잔존수명에 따른 주파수 크기 특성

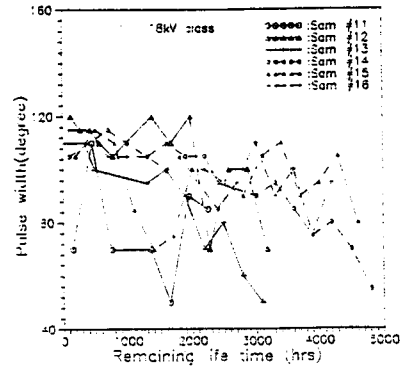


그림 6. 잔존수명에 따른 주파수 위상 특성

### 3.2 방전크기 분석결과

그림 7은 multichannel analyzer를 이용한 부분방전 크기의 측정 결과 중 열화관련 인자로 부극성 MMPD (Maximum Magnitude of Partial Discharge : 부분방전 최대크기; 부분방전 최대 peak치의 10번째 data)의 변화추이를 잔존수명 시간에 대하여 나타낸 것이다. 이를 살펴보면, 전반적으로 시료의 초기상태에서는 MMPD가 2,000 pC의 값으로 나타났으나 이후 가속열화 시간에 따라 일정한 MMPD의 증가현상을 보인후 MMPD가 10,000 pC을 초과하는 상태에서 시료의 파괴가 발생되었다. 정극성의 경우도 부극성과 비슷한 경향으로 가속 열화 진행에 따라 MMPD의 증가현상이 나타났다. 단, 열화 300 시간대의 MMPD 값이 초기상태보다 적게 나타난 것은 시료의 안정화 단계라고 생각된다.

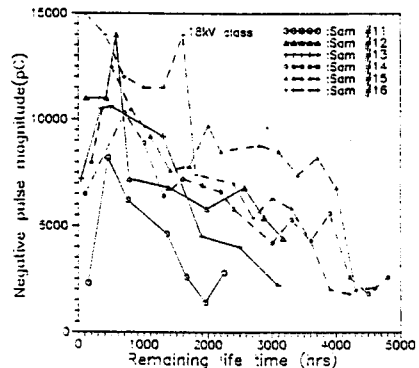


그림 7. 잔존수명에 따른 부극성 MMPD 특성

### 3.3 방전 발생간격 분석결과

Time interval analyzer를 이용한 부분방전 발생간격의 시험결과 가속열화 시간의 증가에 따라 부분방전 발생량이 많아지며 특히 발생간격이 좁은 영역(300μs 이하) 일수록 발생량의 증대 정도가 많아져 전체적 기술기가 변화함을 알 수 있었다. 이는 시료의 열화 진전에 따라 적은 크기의 부분방전이 많이 발생됨을 알 수 있는 결과이다. 그러나, 큰 크기의 부분방전을 나타내는 넓은 발생간격(400μs 이상)에서의 방전 발생갯수의 증가현상은 미약한 실정으로 나타나 열화정도에 상응하는 정보를 얻기가 어렵게 나타났다.

### 3.4 상용 부분방전 크기 및 유전점정 분석

그림 8과 9는 Tettex PD Detector 및 Tettex Schering Bridge로 측정된 시험결과를 나타낸 것이다. 이는 현재 고전압 시험에서 가장 일반적으로 많이 사용되는 시험방법으로 앞서 시험한 시험결과들과 비교하기 위하여 실시하였다. 그림 8은 18kV에서 측정된  $\tan \delta$  값과 부분방전이 발생되지 않는 상태인 4kV에서 측정된  $\tan \delta$  값의 차이인  $\Delta \tan \delta$ 의 변화추이를 나타낸 것으로, 전반적으로 가속열화 시간의 증가에 따라  $\Delta \tan \delta$ 의 크기가 증가하는 것으로 나타났다. 그림 9는 상용 부분방전 방법으로 측정된 부분방전의 최대크기의 변화추이를 나타낸 것으로, 전반적으로 2,000 pC의 초기상태에서 시작하여 열화 후 20,000 pC 이상의 최대 크기에 도달 후 시료의 파괴가 발생하였다.

이 결과는 앞서 언급된 주파수 및 방전크기의 측정결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

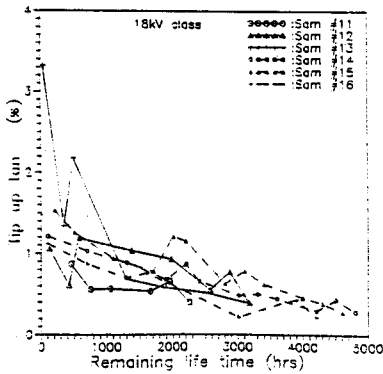


그림 8. 잔존수명에 따른  $\Delta \tan \delta$  크기 특성

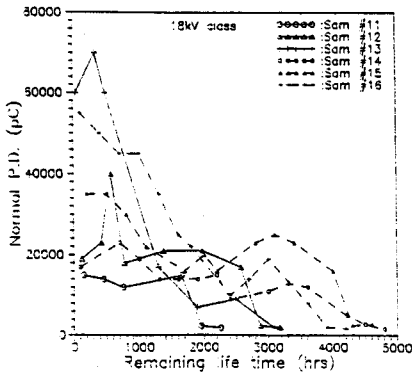


그림 9. 잔존수명에 따른 상용 부분방전 크기 특성

### 4. 결론

본 연구에서는 절연열화의 진행 상태에 따라 변화되는 부분방전의 여러가지 특성 인자를 파악하기 위한 시험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Spectrum analyzer를 이용한 주파수 분석에서는 5MHz 근처의 주파수를 이용하며, 그 중 부분방전 최대크기 및 부분방전 발생 위상폭(DIA - DEA)을 이용하여 열화상태를 판단할수 있었다.
- 2) Multichannel analyzer를 이용한 부분방전 크기 분석에서는 부분방전 최대크기를 나타내는 MMPD의 변화추이로 부터 열화상태를 판단할수 있었다.
- 3) Time interval analyzer를 이용한 부분방전 발생간격 분석에서는 열화상태에 따른 인자를 발견하기가 어려웠다.

### 5. 참고문헌

- 1) 特別高壓回轉機の劣化診断技術調査専門委員會, "特別高壓回轉機の絶縁劣化診断技術", 日本電氣學會技術報告 (II部) 第267號, 1988.
- 2) 固體絶縁物絶縁劣化判定試驗法調査専門委員會, "絶縁劣化診断試驗方法", 日本電氣學會技術報告 (II部) 第182號, 1985.
- 3) 發電機捲線絶縁劣化判定基準委員會, "發電機捲線絶縁劣化判定基準", 日本電力中央研究所技術研究報告 No.67001, 1968.
- 4) I.M.Culbert, H.Dhirani and G.C.Stone, "Handbook to Assess the Insulation Condition of Large Rotating Machines (Volume 16)", EPRI publication EL-5036, 1989.
- 5) "電氣設備の診断技術", 日本電氣學會, 1990.
- 6) Y.J.Kim, "Partial Discharge Spectroscopy for Insulation Diagnosis", RPI Press, New York, 1987.