

## 전기적 방법을 이용한 전력용 콘덴서 열화특성 연구

A Study on the Aging Characteristics of Power Capacitors  
using Electrical Methods김은식<sup>o</sup>, 김영욱<sup>\*</sup>, 김종서<sup>\*</sup>, 윤철섭<sup>\*</sup>, 박대희<sup>\*\*</sup>  
(Eun-Shik Kim, Young-Wook Kim, Jong-Seo Kim, Chul-Sup Yoon, Dae-Hee Park)

\*전기안전시험연구원(ESLRI), \*\*원광대학교 전기전자공학부

## Abstract

Power capacitors are highly reliable equipment due to their completely enclosed configuration. Aging diagnosis system using partial discharge(PD) and acoustic emission(AE) is being highlighted as a research area for degradation of power capacitors. Their dielectric strength can be however reduced due to some stresses such as over-voltage or thermal degradation of the insulation material during their long period of operation.

In this paper, it has been developed to express the AE of the EVENT(average amplitude) and HIT(pulse count) according to the source location. And real time measurement of PD signals for aging diagnosis of power capacitors.

**Key Word(중요단어)** : Power Capacitors(전력용 콘덴서), Partial Discharge(부분방전), Acoustic Emission(음향방출)

## 1. 서론

전력용 콘덴서는 1919년 GE사(미국)에 의해 공업용으로 개발된 이후 급속히 발전하여 현재 전력계통의 전압조정, 부하의 역률개선 등의 목적으로 전기사용장소에 이용된다<sup>(1)</sup>. 그러나 장시간 사용중에 가해지는 서지(Surge), 과전압, 유전손 등의 전기적, 열적 스트레스와 경년열화에 의해 절연특성이 저하되어 절연파괴에 이르게 되며,<sup>(2)(3)</sup> 정전, 부하설비의 손상, 폭발 및 화재를 동반하는 경우가 종종 발생한다. 이때 열화를 진단하는 기술은 비파괴 측정에 의해서 평가되고 있으나, 이러한 방법으로는 유지·보수와 열화상태 등을 정확하게 파악할 수 없는 단점이 있다.

전력용 콘덴서는 부분방전이 발생하지 않는 장소에 설치 및 사용하여야 하며, 특히 부분방전이 발생하는 시점을 콘덴서의 수명(기대특성을 유지할 수 없는 상태)으로 보며 전압열화의 영향보다 경년열

화, 열적 스트레스에 의한 요인이 지배적이다<sup>(4)</sup>.

콘덴서의 유전재료 열화는 절연지 열화와 폴리프로필렌(PP)필름의 열화가 있다. 절연지의 경우, 열적 스트레스를 받게되면 절연지가 분해되며, 분해생성물로 CO, CO<sub>2</sub> 가스가 발생, 절연유중에 용존하게 된다. 그리고, 가스농도의 증대에 의해 절연유의 절연내력이 저하되고 부분방전 특성이 낮아지게 된다. 또한, 투입시에 과전압에 의해 부분방전이 발생하며 상태진전으로 방전에 의해 절연유가 분해되고 분해가스는 H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 가 발생, 점차 부분방전 전하가 증대되다가 최종적으로 절연파괴에 이르게 된다.

PP필름의 경우, 열 스트레스에 의한 PP필름의 직류 내전압 특성이 저하하는 경향을 나타낸다. 콘덴서의 유전체는 복수판으로 구성되어 필름의 열화에 의해 약점부분이 생기게 되고 결국 소자의 절연 레벨은 저하된다. 또한 PP필름의 열화는 소자의 절연내력에 영향을 미치기 이전에는 유증가스 농도

증대에 의해 부분방전 절연특성이 저하되기 때문인 것으로 추정할 수 있다<sup>(5)(9)</sup>.

본 연구에서는 가속열화 실험장치를 제작하여 과전압, 열, 복합열화에 의해 열화 시킨후, 부분방전 및 화학적인 분석법을 이용하여 전력용 콘덴서의 잔여수명 및 교체시기 등을 평가하고자 한다. 열화 진단 평가는 부분방전 시스템(Partial Discharge System : MS/SPAC-120, 일본)과 음향방출 시스템(Acoustic Emission System : SPARTAN-2000, 미국)을 이용하여 열화과정을 관찰하였다. 또한 가스 크로마토그래프 시스템(Gas Chromatography System : HP-GC6890, 미국)을 이용한 화학적 검출법으로 절연열화를 평가하고 효과적인 전력용 콘덴서의 열화 평가법을 제시하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 시편은 정격전압( $E_n$ ) 3.3~6.6[kV], 3 $\phi$ , 60[Hz], 50~300[kVA]로 신콘덴서 2대와 열화 콘덴서 7대를 수집하여 사용하였다. 가속열화 실험장치에는 전압열화를 위한 고전압 발생장치(Transformer Test System : TTS)로 0~30[kV], 3 $\phi$ , 60[Hz]를 이용하였으며, 열 발생장치는 히터용량 220V/5kW, 온도조절 범위는 0~360[ $^{\circ}$ C]이며, 200[ $^{\circ}$ C]까지 도달시간이 30분 이내로 설계 온도지시기와 마그네틱 스위치를 이용 설정 온도와 시간을 자동으로 조절할 수 있도록 하였다. 그림 1은 가속열화 실험장치 및 열화측정 사진을 나타낸다.

콘덴서의 평균수명은 20년으로 설정하였으며, 전압은  $1.0E_n \sim 2.5E_n$  배로 인가시켰고 열은 80~120[ $^{\circ}$ C]까지 상승시켰으며, 열화는 3차로 구분하여 실험하였다. 3차 열화 후 열화상태 확인으로 절연유 가스분석을 실시하여 콘덴서 수명말기 현상으로 나타나는 가스를 분석 최종 열화된 것으로 판정하였다. 전압과 열 열화를 위한 수명 계산식은 Arrhenius식을 이용하였으며, 식(1), (2)는 전압 및 열열화 산출식으로 다음과 같다<sup>(6)</sup>.

$$\frac{L}{L_0} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^{-n} \quad (1)$$

$$\frac{L}{L_0} = 2^{-\frac{t-t_0}{\Delta t}} \quad (2)$$

여기서, L은 전압 V(인가전압)와 온도 t(구하고자 하는 온도)에 있어서의 수명이고,  $L_0$ 는 전압  $V_0$ (정격전압)와 온도  $t_0$ (1년간 최고 평균온도 : 25[ $^{\circ}$ C])에 있

어서의 수명,  $\Delta t$ 는 7~8[ $^{\circ}$ C](수명 반감에 상당한 온도차), n은 유전체에 의해 변화되는 전압 가속지수(9~11)를 나타낸다.

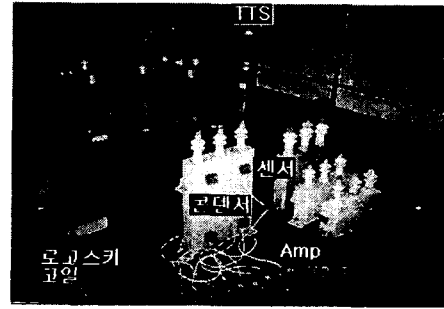


그림 1. 가속열화 실험장치 및 열화측정 사진

### 2.1 부분방전(PD) 검출

그림 2는 부분방전 펄스 검출 블록선도를 나타냈다. PD 검출은 용이한 로고스키 코일(Rogowski coil)을 이용하여 사용하였다. 방전펄스는 대역통과 필터(BPF)를 사용하여 100[kHz] 주파수 성분의 신호가 증폭기(Pre-Amplifier)에 유도된다. 80[dB]까지 증폭된 신호는 Peak Holder 회로를 경유 A/D 변환기로 보내지며 노이즈를 제거한 후 데이터는 프린터와 RS-232C를 이용 분석용 컴퓨터로 전송된다<sup>(5)(7)</sup>.

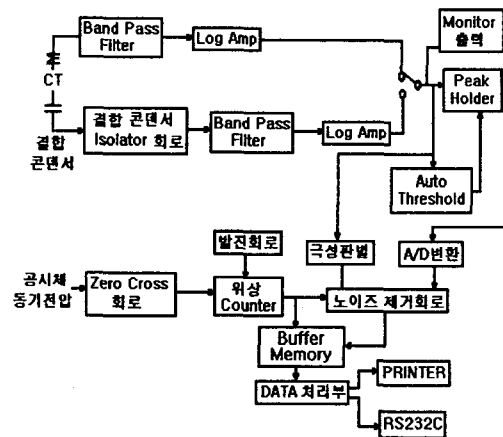


그림 2. 부분방전(PD) 펄스 검출 블록선도

## 2.2 음향방출(AE) 검출

그림 3은 음향방출(Acoustic Emission) 검출 블록 선도로 음향센서는 공진주파수 500[kHz]되는 광대역 센서를 사용하였다. 미약한 음향신호는 40[dB]의 전치증폭기로 증폭하였다. 측정시 최대한의 노이즈를 제거하기 위해 이득(Gain)과 문턱준위(Threshold), 유증전달 속도는 35[dB]와 23[dB], 약 2,000[pps]로 하여 확실한 음향신호를 얻을 수 있었다. 또한 콘덴서에 부착되는 센서의 수량은 최적화 실험을 통하여 8~10개로 선정 사용하였다.<sup>(5)(8)</sup>

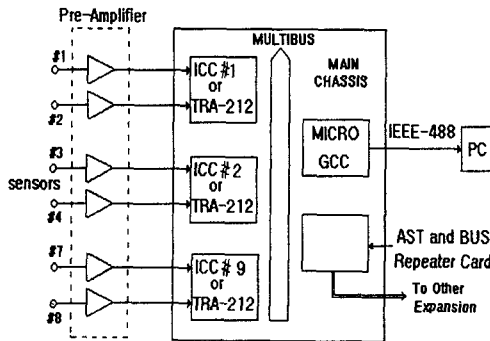


그림 3. 음향방출(AE) 검출 블록선도

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 부분방전(PD) 특성

그림 4는 전압 및 열 열화의 특성 그래프로 전압 1.0E<sub>v</sub>/25[°C], 2.5E<sub>v</sub>/25[°C]에서와 전압 1.0E<sub>v</sub>/120[°C], 2.5E<sub>v</sub>/120[°C]일 때 시간과 방전량과의 관계를 나타낸 것이다. 이 결과 열열화의 경우, 전압열화 보다 초기 값은 저하하는 경향을 나타내며, 열화가 진전되면서 부분방전 특성이 급격하게 낮아지는 경향을 보이고 있다. 또한 그림 5는 부분방전 열화 패턴과 방전 분포를 나타낸 것이다. 방전 초기 위상-방전량( $\phi$ -q), 위상-방전펄스 빈도( $\phi$ -N)은 각각 262[pC], 6[pps]로 검출 되었으나, 방전 말기에 3,000[pC], 10[pps]로 나타났다. 이것은 과전압과 열열화에 의한 방전 패턴은 방전 초기에는 일정한 위상에서 방전이 시작되지만, 절연열화가 진전 될수록 방전량의 분포는 전면적인 위상으로 확산되고 있음을 확인할 수 있고, 방전발생 빈도가 50[%] 이상 증가됨을 확인하였다. 이것은 콘덴서 절연열화시 방전신호를 정량적으로 분석하여 절연과피에 관한 열화특성을 확인하였다.

이상의 결과로 부분방전의 신호를 정량화 함으로써 부분방전은 900[pC] 이상의 값을 수명 말기 단계로 설정하여 특성을 관찰할 수 있었다.

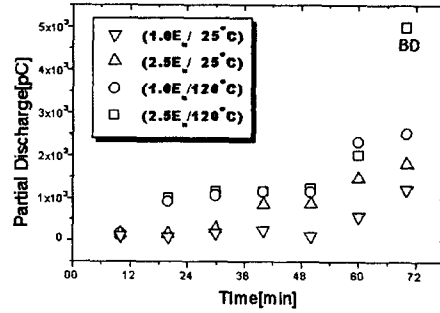
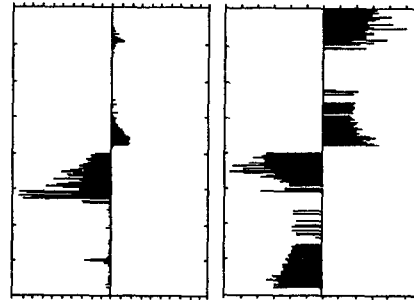


그림 4. 전압 및 열열화에 의한 pd - t 특성



(a) 방전 초기 (b) 방전 말기

그림 5. 부분방전에 의한 절연열화 패턴

### 3.2 음향방출(AE) 특성

음향방출에 의한 콘덴서 절연열화 상태를 음향신호 즉, EVENT와 HIT수에 따라 판별하는 방법을 적용하였다. 이때 검출 입력 파라메터인 Gain과 Threshold를 반복적으로 변화시켜 오차를 감소시킴으로써 최적의 센서 감도를 선정하였다. 절연열화 검출을 위한 알고리즘의 적절한 파라메터로 Pre-Amp의 증폭도는 40[dB], 판별장치의 Gain은 35[dB], Threshold는 23[dB]로 선정하였다.

이 결과 전압 및 열 열화시 음향방출의 시간적 절연열화에 대하여 정량적 검출과 방전에 의한 열화의 발생원으로 위치점 탐지가 가능하였다. 그림 6은 1.0E<sub>v</sub>/25[°C]일 때 방전 초기 열화 패턴과 2.5E<sub>v</sub>/120[°C] 일 때 방전 말기 열화 패턴을 확실하

게 보여주고 있다. 방전 말기는 EVENT수가 500개 이상 검출되고 (b)와 같이 막대(Bar)가 세로군(Group)으로 집중적으로 형성되면 방전에 의한 것으로 추정하였다.

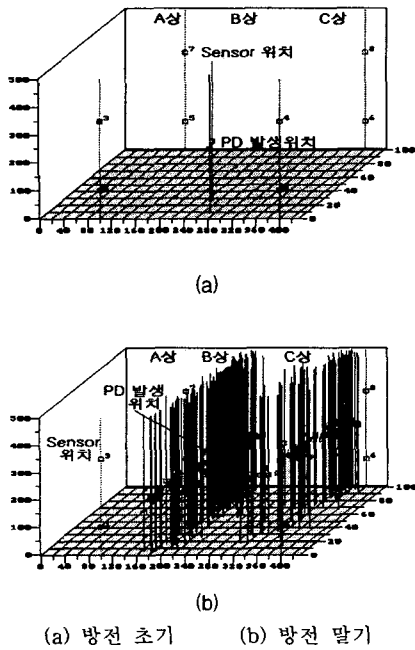


그림 6. 음향방출에 의한 절연열화 패턴

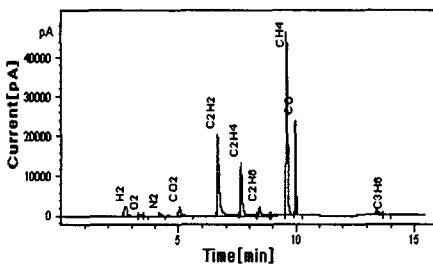


그림 7. 절연유 가스분석 특성

그림 7은 최종적으로 절연과괴된 절연유를 분석한 결과이다. 전압 및 열 열화로 인하여 절연지나 절연유가 분해되어 가스가 발생한 것으로 신유의 가연성 가스총량(TCG)은 12[ppm]정도이나<sup>(6)(9)</sup> 열화 말기 20,000[ppm] 이상 검출되었다. CO<sub>2</sub>와 CO는

열열화의 지표로 유효한 가스이며, H<sub>2</sub>와 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>는 전압열화에 의한 부분방전 발생에 기인하는 위험한 가스로 경향(Trend)관리 항목으로 중요하다.

콘덴서의 절연열화 검출은 PD, AE를 이용하여 열화특성을 평가하고, 화학적 분석법을 이용하여 전력용 콘덴서의 절연열화 진단을 신뢰성 있게 평가할 수 있었다.

#### 4. 결론

연구 결과 전력용 콘덴서를 무정전 상태에서 PD 펄스 신호를 정량적으로 검출하여 PD 패턴 특성을 분석하였으며, 또한 AE에 의한 콘덴서 내부의 방전 초기에서 말기까지 발생 위치점을 탐지할 수 있었다.

1) PD 신호를 열화 초기와 말기까지 정량화 함으로써 전압 및 열열화에 의한 열화특성을 추정할 수 있었다.

2) 절연열화에 의한 내부 PD 발생시 유입기기와 동일한 AE 검출로 위치점 탐지가 가능하였다.

3) 화학적 분석으로 콘덴서의 절연특성은 전압 및 열열화와 밀접한 상관관계가 있으며, 유증가스 농도의 증대는 PD 절연특성을 저하시킨 것으로 분석된다.

이상과 같이 전기적, 화학적 검출법을 이용한 전력용 콘덴서의 열화진단 적용에 응용할 수 있을 것으로 기대하며, 향후 양호한 PD 검출과 정확한 위치탐지를 위해서는 측정 데이터의 축적과 측정방법의 단계별 계속적인 연구가 필요하다.

#### 참고 문헌

- [1] 室谷金義 外2人, “電力用コンデンサの歩進みと動向”, 日新電機技報, Vol. 36, No. 4, 1991.
- [2] 西松峯昭 外2人, “最近の電力用コンデンサの動向” 日新電機技報, Vol. 34, No. 3, 1989.
- [3] 岡部成光 外4人, “電力用油浸紙コンデンサの劣化特性について”, T.IEE Jpn., Vol.115-A, No.1, 1995.
- [4] 同井貞喜岡 外5人, “電力用コンデンサ劣化診断法の研究”, 静止機器研究會, Jpn., SA-90-52, 1990.
- [5] C. Hantouche, “Measuring Technique of Partial Discharges on Power Capacitor”, CIGRE, WG, Vol.15-05, 1991.
- [6] “電力用コンデンサ稼働保全技術”, 電氣學會, 제521호, 1994.
- [7] C. Hantouche, D. Fortune, “Treatment of P. D in Full Size Power Capacitor by Digital Technique”, CIGRE, WG, Vol.15-05, 1992.
- [8] G.E. Mercier, “Electric Council of New England T & D Committee Meeting Report”, No. 53, 1978.
- [9] 岡部成光 外4人, “油入変壓器の油中ガス分析による早期異常診断法の検討” T.IEE Jpn., Vol.116-B, No.9, 1996.