

유입 변압기 진단을 위한 유중 열화 측정 센서의 개발

°민경래\* · 윤용한\* · 김영춘\*\* · 김재철\*\*\*  
 \*(주)테크빌 · \*\*한국건설기술연구원 · \*\*\*송실대학교 전기공학과

Development of Deterioration Detecting Sensor in Oil  
 for Diagnosis of Oil-Filled Transformers

°Kyeoung-Rae Min\* · Yong-Han Yoon\* · Young-Chun Kim\*\* · Jae-chul Kim\*\*\*  
 \*Techvill Co., Ltd. · \*\* KICT · \*\*\*Dept. of Electrical Eng., Soongsil University

**Abstract** - This paper develops the deterioration detecting sensor in oil to monitor and diagnose oil-filled transformer more effectively. The on-line inspection of the oil-filled transformers used the temperature, the changes of the capacitance, the  $\tan\delta$  in oil. This sensor was designed based on the concentric cylindrical type so that it could be placed inside of the oil-filled transformer. And comparing to the existing system, it was proven to be appropriate. Establishment of the proposed sensor helps to build the confidence in monitoring of the oil-filled transformers.

정전 용량 측정 센서는 피 측정물의 정전 용량 변화를 측정하는 방식으로 전극의 선택에 따라 비 도전성 액체, 도전성 액체 및 분체, 입체 등의 측정에 사용된다. 특히, 정전 용량 센서는 제작이 비교적 간단하고, 가격이 저렴하며, 제작 방법에 따라 선행도를 높일 수 있으며, 측정 대상의 형태에 따라 센서의 구조를 여러 가지로 선택할 수 있다[4,5].

물질은 각각 고유한 유전율을 가지고 있으며, 전기적으로 절연된 2개의 전극이 있을 때 그 사이의 정전 용량은 전극의 치수, 모양, 거리 및 물질의 유전율에 따라 결정된다[4]. 본 논문에서는 기계적인 가동 부분이 없고, 단순한 구조로서 설치, 보수가 쉬운 동심 원통형 구조의 센서를 개발하여 유입 변압기의 감시 및 진단 장치에 적용하고자 한다.

그림 1은 일반적인 동심 원통형 구조의 유중 열화 측정 센서의 구조적인 모습을 나타낸 것이다.

1. 서론

전력은 각종 산업이나 일상 생활에서 필수 불가결한 것이다. 과거 고도 성장의 시대에서 저 성장의 시대로 이행되고 있는 오늘날, 전력 수요도 급속한 증가에서 안정적 성장으로 변화되고 있다. 이러한 시기에는 전력 설비를 교체하는 빈도가 저하되기 때문에 현재 가동하고 있는 전력 설비의 원활한 운용과 신뢰성 확보가 매우 중요한 문제다. 따라서, 전력 설비의 유지 및 보수를 합리화하고 사고를 미연에 방지하기 위해서는 전력 설비의 운전 중에 이상의 징후를 감시하고 진단하는 계측 기술이 종래보다 더욱 중요한 연구로 대두되고 있다[1-3].

본 논문에서는 배전용 유입 변압기의 이상 상태를 운전 중에 상시 감시할 수 있는 유중 열화 측정 센서를 개발하였다. 유중 열화 측정 센서는 동심 원통형 커패시터 형태를 기초로 설계하여 배전용 유입 변압기 내에 설치할 수 있게 하였고, 성능을 기존 센서와 비교하여 타당성이 있음을 검증하였다. 배전용 유입 변압기 내부에 설치할 수 있는 유중 열화 측정 센서는 절연유의 온도를 측정할 수 있고, 높이에 따라 절연유의 정전 용량과 유전정점을 구분하여 측정할 수 있다. 따라서, 유전정점의 변화로 변압기 하부의 침전물 및 수분 등에 의한 유전정점의 변화를 감지할 수 있고, 상부에서 측정된 정전 용량으로는 절연유의 유위 변화를 감지할 수 있다. 이것은 배전용 유입 변압기의 현 상태를 감시할 수 있는 중요한 자료로 활용할 수 있고, 정밀 진단을 위한 기초 자료로도 활용할 수 있다.

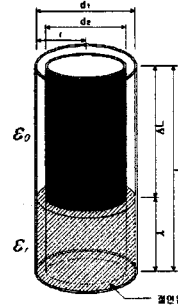


그림 1. 동심 원통형 구조의 유중 열화 측정 센서

원통형 센서의 길이가 L이고, 지름이 각각 d1, d2인 두 개의 동심 원통이 있다. 센서의 길이가 매우 길어서 (L) >> d1) 센서 끝에서 전기력선의 영향을 정전 용량의 계산에 있어서 무시할 수 있다고 가정하자. 즉, 평면 덮개로 싸여진 공기 중의 지름 r, 길이 d1의 동심 원통형의 가우스 표면을 생각하고 이에 가우스의 법칙(4)을 적용한 후, 정전 용량을 구하면 식 (1)과 같이 표시된다.

$$C = \frac{q}{V} = \frac{2\pi\epsilon_0 L}{\ln(d_1/d_2)} \quad (1)$$

즉, 센서의 기하학적 요소인 L, d1 및 d2에만 의존하고 있다.

2.2 센서의 정전 용량 변화와 절연유의 유위 관계

만약, 동심 원통형의 경우, 그림 1과 같이 높이 l의 위치에 비유전율  $\epsilon_r$ 의 매체가 있을 때, 공기 중의 유전율을  $\epsilon_0$ 로 하면 전극 사이의 정전 용량 C는 식 (2)와

2. 유중 열화 측정 센서

2.1 센서의 구조 및 정전 용량

기존의 유전정점 측정 장치 및 분석 장치는 고가이면서 아날로그 방식이며, 잡음에 민감하여 현장에서 적용하기에는 곤란하다[1,3]. 또한, 현재 상용화되어 있는 대부분의 측정 장치는 오프라인 상에서 동작하는 장치이다. 따라서, 본 논문에서는 유입 변압기의 절연유를 상시 감시 및 진단하기 위한 유중 열화 측정 센서를 개발하였다.

같이 표현된다[4].

$$\begin{aligned}
 C &= C_1 + C_2 \\
 &= \frac{2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot l}{\ln d_1/d_2} + \frac{2\pi \cdot \epsilon_0 (L-l)}{\ln d_1/d_2} \quad (2) \\
 &= \frac{2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot L}{\ln d_1/d_2} + \frac{2\pi \cdot \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) \cdot l}{\ln d_1/d_2}
 \end{aligned}$$

- 단,  $C_1$  : 매질이 있는 부분( $l$ )의 정전 용량[F]  
 $C_2$  : 진공 부분( $L-l$ )의 정전 용량[F]  
 $\epsilon_0$  : 진공에서의 유전율[F/m]  
 $\epsilon_r$  : 매질의 비유전율[F/m]  
 $L$  : 센서 전극의 길이[m]  
 $l$  : 매질의 높이[m]  
 $d_1$  : 센서 외부 외통의 내경[m]  
 $d_2$  : 센서 내부 내통의 외경[m]  
 $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$  : 매질의 유전율[F/m]

즉, 전극의 모양, 치수, 구조적인 크기( $d_1, d_2, L$ ) 및 매질의 비유전율( $\epsilon_r$ )을 미리 알고 있으면, 정전 용량( $C$ )을 측정하면 비유전율과 매체가 채워진 높이  $l$ 을 구할 수 있다[4]. 즉,  $l$ 은 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned}
 l &= \frac{\ln d_1/d_2}{2\pi \epsilon_0 (\epsilon_r - 1)} \cdot \left( C - \frac{2\pi \epsilon_0 L}{\ln d_1/d_2} \right) \quad (3) \\
 &= \frac{C \cdot \ln d_1/d_2}{2\pi \epsilon_0 (\epsilon_r - 1)} - \frac{L}{\epsilon_r - 1}
 \end{aligned}$$

따라서, 이  $l$ 로부터 유입 변압기의 유위를 쉽게 측정할 수 있다.

### 2.3 센서의 설계, 구조 및 기능

본 논문에서는 유중 열화 측정 센서를 개발하기 전에 다음과 같은 사항들을 고려하였다.

- (1) 상시로 측정이 가능해야 한다. 이러한 전제 조건은 절연 진단이 전력 품질을 보증하기 위한 작업이므로 전력 품질을 떨어뜨리는 정전을 일으켜서는 안되기 때문이다. 또한, 전국적으로 분포된 다량의 배전용 유입 변압기를 효과적으로 진단하기 위함이다.
- (2) 감시 및 진단 장치는 사용하기 간편해야 한다. 왜냐하면, 측정 기법과 측정 장치의 사용법이 복잡하면 다량의 배전용 유입 변압기를 주기적으로 측정하는 것이 어렵기 때문이다.
- (3) 컴퓨터에 의한 측정이 가능해야 한다. 컴퓨터에 의한 측정 장치는 대부분의 측정이 프로그램에 의해 자동으로 실시되어 측정 오차가 줄어든다. 또한, 컴퓨터를 이용하면 자료의 저장이 용이하며 자동적으로 경향 분석이 가능하다.
- (4) 감시 진단용 유중 열화 측정 센서를 배전용 유입 변압기 내에 설치하는 경우에 센서의 내구성은 배전용 유입 변압기의 경우보다 길어야 한다. 센서의 잦은 교체는 관리에 또 다른 어려움을 유발할 수 있기 때문이다.

위와 같은 사항을 고려하여 본 논문에서는 유중 열화 측정 센서를 유입 변압기에 쉽게 설치할 수 있도록 개발하였다. 이때, 센서 내부의 절연유는 유전체로 작용한다. 유입 변압기의 절연유는 열화가 될수록 산성이 강해지므로 이를 견디기 위해서는 스테인레스 스틸과 같은 강한 재질을 사용하여야 한다. 전극의 양단에는 전압을 인가할 수 있는 인출선을 연결하고, 전선의 다른 한쪽에는 간단한 분석 장치를 연결하여 유입 변압기 외부에 설치할 수 있도록 한다.

유입 변압기의 감시 및 진단을 위해 2단 구조의 동심 원통형의 유중 열화 측정 센서를 개발하였다. 상부는 절연유 레벨의 위치를 탐지하기 위한 정전 용량( $C_x$ )을 측정하고, 하부는 유전정점( $\tan \delta$ )을 검출할 수 있게 설계하였다. 센서의 상부와 하부는 절연물로 전기적으로 분리하였고, 절연유가 센서의 내·외부를 자유롭게 유출입할 수 있도록 구멍을 각 부의 상·하부에 설치하였다. 또한, 센서 내부 원심에 백금 온도 센서(PT100 $\Omega$ )를 삽입하여 절연유의 온도 상태를 측정할 수 있도록 설계하였다. 유중 열화 측정 센서의 상부는 각종 분석 장치와 연결될 수 있도록 인출선이 나와 있다. 그림 2는 유중 열화 측정 센서의 설계와 내·외부 구조를 나타내고 있다. 유중 열화 측정 센서의 내·외부 구조 중 분리된 센서 상부의 전극 길이는 100[mm], 센서 하부 전극의 길이는 300[mm], 외부 원통의 내경( $d_1$ )은 18[mm], 내경 원통의 외경( $d_2$ )은 16[mm]이다.

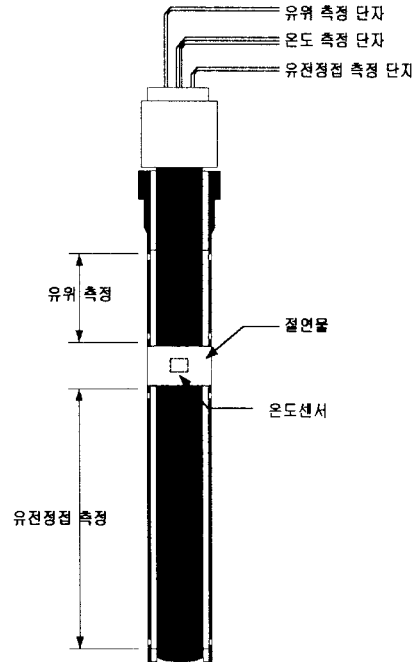


그림 2. 유중 열화 측정 센서의 구조 및 기능

### 2.4 센서의 기능 검증을 위한 실험

본 논문에서 개발한 유중 열화 측정 센서에 대하여 임피던스 분석기를 이용하여 성능에 관한 검증을 실시하였다. 유입 변압기의 경년유와 수분이 함유된 절연유를 대상으로 Hewlett Packard(HP)사의 임피던스 분석기(HP 4294A, precision impedance analyzer)를 이용하여 액체 실험용 HP 셀(HP16452A, liquid test fixture)과 개발한 센서의 위상-주파수 특성을 비교하였다.

그림 3은 유입 변압기의 경년유를 대상으로 측정된 HP 셀과 개발한 센서간의 위상-주파수 특성을 비교한 그래프이다. 그림 4는 수분이 함유된 절연유에 대한 HP 셀과 개발한 센서로 측정된 위상-주파수 특성을 비교한 그래프이다. 그림 4에서는 수분의 영향으로 절연유가 단락된 상태를 알 수 있다. 전체적으로, 본 논문에서 개발한 유중 열화 측정 센서는 위상-주파수 특성 분석 결과 HP 셀과 비교적 일치함을 알 수 있었으며 열화 측정용 센서의 역할을 충분히 할 수 있으리라 판단된다.

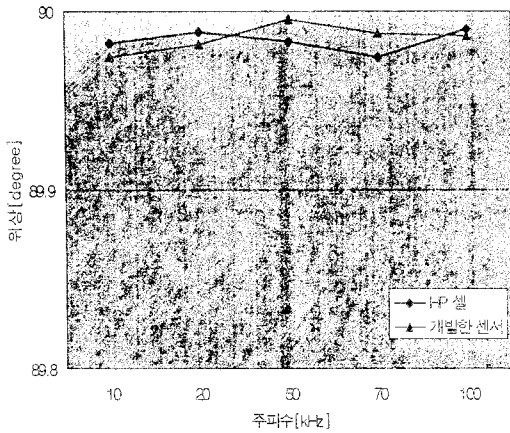


그림 3. 경년유의 위상-주파수 특성

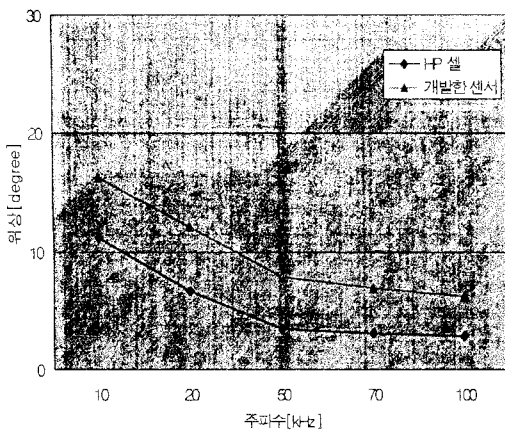


그림 4. 수분이 함유된 절연유의 위상-주파수 특성

### 3. 결론

배전용 유입 변압기의 유중 열화 측정은 자체적으로 개발한 동심 원통형 구조의 유중 열화 측정 센서를 이용하였다. 개발된 유중 열화 측정 센서는 절연유의 온도를 측정할 수 있고, 절연유의 유위 상태를 변화된 정전 용량의 측정으로 판단하여 간단하게 배전용 유입 변압기를 감시할 수 있다. 이것은 배전용 유입 변압기를 감시할 수 있는 중요한 자료로 활용할 수 있으며, 정밀 진단을 위한 기초 자료로도 활용할 수 있다. 그 내용을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 고가의 열화 측정 센서를 대체할 수 있는 동심 원통형 구조의 유중 열화 측정 센서를 개발한 후, 성능을 기존 계측 장치와 비교하여 타당성이 있음을 검증하였다.
- (2) 배전용 유입 변압기의 상판에 탈·부착이 가능하도록 설계하였다.
- (3) 배전용 유입 변압기의 중요 감시 대상인 절연유의 온도를 측정할 수 있게 자체 개발한 센서 내부에 온도 센서(PT100Q)를 설치하였다.
- (4) 배전용 유입 변압기 내부에 설치할 수 있는 유중 열화 측정 센서는 절연유의 정전 용량을 측정할 수 있기 때문에 정전 용량의 변화로 배전용 유입 변압기의 절연 열화 상태를 간접적으로 감시할 수 있고, 또한 절연유의 유위 변화를 감시할 수도 있다.

### (참고 문헌)

- [1] Y. H. Yoon et. al., "Development of A Deterioration Diagnosis Device for Pole Transformer Using signal Processing and wireless communication," *IEEE Power Engineering Society 2000 Summer Meeting at Seattle, Washington, USA.*, Submitted, July 16-20 2000
- [2] 電氣學會, 電氣設備의 診斷技術, 오ム社, pp. 84-89, 1988.
- [3] 月岡 淑郎, "油入變壓器의 外部診斷技術," 오ム誌, 四月號, pp. 40-44, April 1987.
- [4] 電氣學會, 誘電現象論, 오ム社, pp. 15-18, 昭和 48年(1973).
- [5] 정혜선, 노이즈 방지와 대책, 성안당, pp. 57-64, 1991.