

### 3전극형 전기용량 센서를 이용한 변압기 절연유의 열화감지특성 평가

김주한\*, 서판석, 김필환, 김명환, 박홍석, 한상옥  
충남대학교

#### Analysis on the Diagnosis Characteristics of Electrical Insulating Oil for Power Transformer with 3-terminal Capacitive Sensor

Ju-Han Kim\*, Pan-Seok Seo, Pil-Hwan Kim, Myung-Hwan Kim, Hung-Seok Park, Sang-Ok Han  
Chungnam National University

**Abstract** - This paper described the capacitive sensor for the diagnosis of deterioration of electrical insulating oils applying guard-ring type the 3-terminal electrodes. To measure stable capacitance of the sensor and to determine the design factors of the sensor, we utilized computational analysis, FEM software. This capacitive sensor discern the extent of deterioration measuring relative permittivity of electrical insulating oils. The result of measuring numerous sample, mineral oils, as serviced year, we confirmed an increase in relative permittivity of oils. Moreover, we confirmed the superior characteristics of the sensor as a species, aged pattern of oils and operating temperature.

준정비(CBM, Condition Based Maintenance) 등의 개념을 도입하여 유입식 변압기의 주 절연재료인 절연유의 열화진단을 위해 절연유의 열화에 따른 비유전율의 변화를 감지할 수 있는 정전용량형 센서를 제안하였으며, 전산해석을 통해 전극의 배치와 차폐구조 등을 모의하여 기존의 진단방식에 비해 제작이 용이하고 감도가 높은 센서를 설계, 제작하였다. 정전용량형 센서의 열화진단 센서로서의 적용성을 확인하기 위해 우선 한국표준과학연구원원의 크로스 캐패시턴스 원리를 활용한 고정밀 정전용량 측정장비를 이용하여 주상 변압기에서 채취한 다수의 절연유(광유, 1종 제 2호)의 비유전율을 측정하였다. 또한 절연유의 종류와 각 절연유의 열화패턴에 따른 센서의 감지특성을 시험하였으며, 온도에 따른 절연유의 비유전율과 센서의 이력특성을 확인하였다.

## 1. 서 론

경계상태에 따른 전력수요는 지속적으로 증가하고 있으며, 이로 인해 전력계통을 이루고 있는 전력기들은 초고압화, 대용량화되는 추세이다. 하지만 전력계통이 확장되면서 대용량화된 변압기가 부담하는 공급지역이 넓어짐에 따라 사고 발생시 정전구역이 광범위해지며, 이에 따른 과급효과로 인해 경제적 손실 역시 증가하게 된다. 따라서 전력계통을 구성하고 있는 각종 전력기들의 안정성 및 신뢰도 향상이 절실하게 요구되고 있으며 전력설비의 기능 및 성능을 충분히 확보하여 사고를 미연에 방지하기 위한 유지보수 및 절연진단의 필요성이 증가하고 있는 실정이다.

전력계통을 이루고 있는 배전계통의 전력설비의 고장은 상당부분이 변압기 고장사고로부터 기인한다. 변압기 사고는 대부분 절연재료의 열화가 진전됨에 따라 성능이 저하하여 결국 절연파괴가 일어나 발생하므로, 열화된 변압기를 적기에 교체하기 위해 변압기의 절연열화를 조기에 진단할 수 있는 예방진단시스템을 구축하는 것이 매우 중요하다.

국내에서 사용하고 있는 변압기의 대부분은 유입식 변압기이며, 주 절연재인 절연유는 전기적 절연과 냉각작용에 중요한 역할을 담당하고 있다. 그러나 절연유는 변압기의 운전환경에 따라 온도와 수분, 산화 등의 영향으로 열화되며, 절연 및 냉각성능이 현저하게 저하하여 절연파괴와 같은 사고가 발생하게 된다. 그러므로 절연유의 열화상태를 진단하는 것은 매우 중요하다.

절연유의 열화는 절연파괴전압, 산가, 체적저항, 산화안정도, 점도, 인화점, 비색도, 유전정점, 유증가스 등에 영향을 미치므로 이러한 특성들을 측정하면 열화의 정도를 판별할 수 있다. 그러나 위와 같은 진단기법들은 정전시험 내지 채취시험이 대부분이며, 이들 중 일부 시험법들은 경제적 제약으로 인해, 중요한 초고압, 대용량 변압기에 온라인 진단기법으로 적용되어 제한적으로 운용되고 있어 일반 주상변압기에 대한 적용은 전무하다.

이에 본 논문에서는 기존의 정전시험 등의 단점을 개선하고, 예방정비(PdM, Predictive Maintenance), 상태기

## 2. 실 험

### 2.1 정전용량형 센서의 설계 및 제작

본 논문에서는 열화가 진전됨에 따라 절연유의 비유전율이 변하는 것을 고려하여, 절연유 열화를 진단하고자 하였다. 정전용량형 센서를 제작하기 위해선 우선 절연유의 열화에 따른 비유전율의 변화량( $\Delta\epsilon_r$ ), 즉 정전용량의 변화량( $\Delta C$ )을 적절히 선정할 필요가 있다.

전극의 배치 및 외형 설계시 전산해석기법을 활용하여 전극의 형상 및 배치가 센서의 정전용량에 미치는 영향을 조사, 분석하였으며[1], 그 결과 ASTM D 924와 IEC 247에서 제시하고 있는 액체 유전체의 유전상수 측정에 널리 활용하고 있는, 그림 1과 같은 가드링 전극을 지닌 3단자형 전극구조의 센서를 최적 형태로 선정하였다. 가드링 전극을 지닌 3단자 전극구조에서 전극의 edge correction을 첨가하면[7],  $s \ll d_0 \ll R_i \ll R_o$  일 때 정전용량  $C_0$  는 식(1)과 같이 표현된다.

$$C_0 = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{d_0} \left( R_1 + \frac{s}{2} \right)^2 = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r R_i^2}{d_0} \quad (1)$$

where,  $R_i = R_1 + s/2$

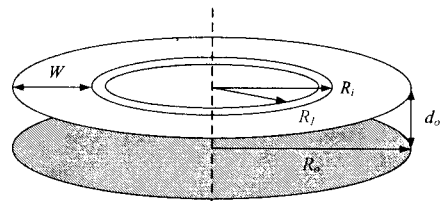


그림 1. 3단자형 전극의 구조  
Fig. 1. Construction of 3-terminal electrodes

그림 2는 3단자 전극을 응용하여 제작한 3전극형 전기

용량 센서의 시작품을 보이고 있다. 변압기 내부에 취부할 경우를 고려하여 센서의 면적을 줄이면서 기존의 전기용량을 확보하기 위해 병렬구조로 하였으며, stray capacitance를 최소화하기 위해 negative 전극을 둘러싼 가드전극 이외에도 positive 전극의 배면에 쉴드전극을 적용하여 이중 정전설드를 구성하여 변압기 내부의 전자계 영향이나 외부 노이즈를 최대한 배제함으로써 안정한 전기용량을 취득할 수 있도록 제작하였다.

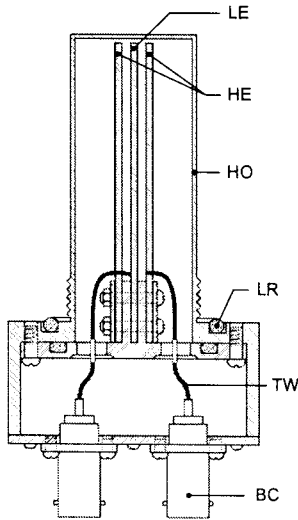


그림 2. 시작품 센서의 단면도  
Fig. 2. Cross-sectional view of prototype sensor

2.2 실험장치의 구성

그림 3은 전기용량 센서의 특성평가를 위한 실험장치의 외관이다. 그림 3을 참조하면, 황동계질의 오일 챔버 내에 측정용 센서를 배치하고, 전원인가와 전기용량의 측정을 위한 일체의 배선설에는 BNC 케이블과 BNC 커넥터를 적용함으로써 외부 노이즈에 의한 영향을 배제시킬 수 있도록 하였다. 또한 외기의 유입 및 누유 등을 방지하기 위하여 고내온성의 Viton O-ring을 결합부에 취부하였다.

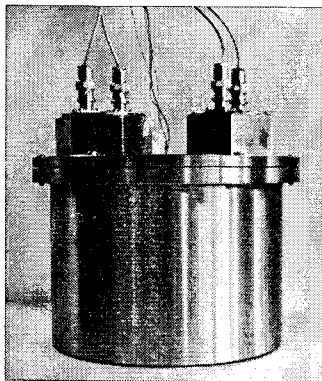


그림 3. 전기용량 센서의 특성시험을 위한 시험셀  
Fig. 3. Test cell for evaluation of capacitive sensor

한편, 시작품 센서의 전기용량은 LCR meter를 사용하여 10kHz의 주파수에서 측정하였으며, 시료의 전기용량 값이 온도에 영향을 받으므로 전기용량 센서 부근에 온도 측정용 센서를 설치하였다. 유온의 측정에는 Glass Type RTD(Pt 100Ω)를 사용하였으며, 온도 측정용 신호선으로는 고내열성의 ETFE(Ethylene and Tetrafluoroethylene)을 사용하였다. 시료의 온도는 Oil bath를 이용하여 제어하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 시작품 센서의 감도 특성

그림 4는 경년열화된 변압기 절연유(광유, 1종 제2호) 샘플들을 국가표준기관인 한국표준과학연구원의 고정밀 비유전율 측정장비로 측정된 결과와 본 논문을 통해 제작된 시작품 센서의 비유전율 측정결과를 비교한 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 한국표준과학연구원의 고정밀 측정장비와 시작품 센서의 측정결과가 잘 일치하고 있음을 알 수가 있으며, 이는 시작품 센서가 시료의 비유전율을 정확히 측정할 수 있음을 의미한다.

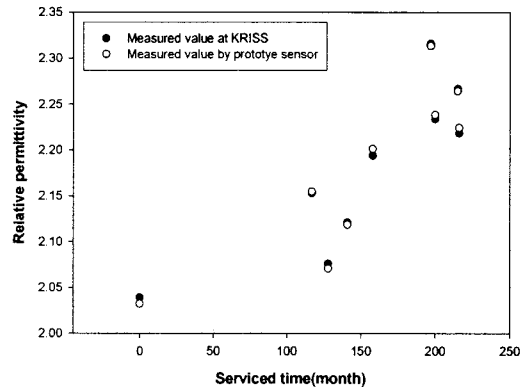


그림 4. 시작품 센서의 감도특성  
Fig. 4. Sensitivity test of prototype sensor

3.2 사용기간에 따른 절연유의 비유전율 특성

절연재료에 교류전압을 인가하였을 때 발생하는 전력 손실인 유전손실은 재료의 유전정접(tanδ)과 비유전율에 비례하며, 비유전율은 유전체가 전계 하에서 모든 종류의 기구에 의해 발생하는 전기 분극에 의해 결정된다. 또한 절연재료가 양호한 상태에선 유전손실이 매우 적으나, 수분 내지 기타 불순물에 의해 열화가 진전되면 유전손실이 증가하는 것으로 알려져 있다.

따라서 변압기 절연유의 경년열화와 비유전율간의 상관관계를 분석하기 위해 한국표준과학연구원의 Cross Capacitance의 원리를 이용한 고정밀 전기용량 측정시스템을 활용하였으며, 장시간에 걸쳐 운전된 공급지역이 서로 다른 주상 변압기의 절연유를 채취하여 비유전율을 측정하였다. 측정조건으로 온습도는 상온상습(23±0.2℃, 55±5%), 측정 주파수는 10kHz였다.

그림 5는 사용기간에 따른 광유의 비유전율의 변화추이를 제시하고 있다. 전체적으로 변압기의 운전 시간이 늘어남에 따라 비유전율이 증가하는 경향을 나타내었다. 각 변압기 공급지역의 부하율이나 환경적인 조건이 다를 수 있으므로 상호간의 직접적인 비교를 통한 평가는 적절하지 않은 것으로 판단되나 약 200여 개월에 걸쳐 사용된 절연유의 비유전율 측정 결과는 미사용 절연유에 비해 약 10 % 증가한 값을 나타내었다. 이는 산화반응 내지 산화물의 생성 등과 같은 일련의 경년열화 현상과 밀접한 관련성이 있는 것으로 추정된다.

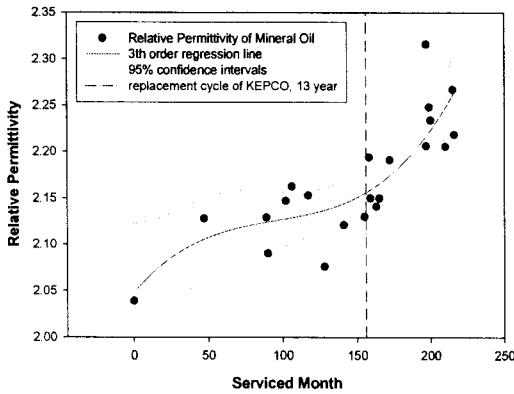


그림 5. 사용기간에 따른 광유의 비유전율  
Fig. 5. Relative permittivity of mineral oils versus serviced months

### 3.3 시료의 구성

본 연구에서는 변압기용 절연유의 주류를 이루고 있는 광유(1종 2호, 현대 화학)에 대해 센서의 측정 감도를 평가하였다. 광유는 신품과 가속열화된 시료 이외에 신유의 수분함유량을 달린 시료와 현장에서 약 15년간 사용된 시료를 사용하였다. 가속열화시킨 시료는 가속열화 시험셀 내부에 50KVA 급 변압기에 사용되는 재료와 유사한 비율로 절연지와 절연유, 규소강판, 권선코일 등을 합침시킨 후 130°C의 온도에서 1000, 3000시간 동안 가열하였다.

실험에 사용된 광유의 전기적, 화학적 특성은 표 1에 나타내었다. 시료의 절연과피전압은 IEC 156-1963에 의거하여 절연유 내전압 시험기인 AVO MEGGER FOSTER OTS 60AF/2로 측정하였으며, 수분함유량은 Karl Fischer Titration Method에 의거한 MITSUBISHI CHEMICAL CORPORATION CA-100 Moisturemeter로 측정하였다.

표 1. 열화 조건에 따른 절연유의 특성  
Table 1. Property of electrical insulating oils about aged conditions

Aged condition	Symbol	Moisture Contents (ppm)	Breakdown voltage (kV)
Virgin	NMO	11.2	52.0
Water polluted	WMO	21.9	42.7
Accelerating Aged	AMO-I	21.0	38.4
	AMO-II	45.0	50.0
	AMO-III	13.6	10.9
Actual aged	AAMO-I	21.5	42.7
	AAMO-II	21.5	42.7

※ AAMO-I : 130°C, 1000h  
AAMO-II,III : 130°C, 3000h

### 3.4 절연유의 열화 패턴에 따른 센서의 감지특성

그림 6은 다양한 조건으로 열화된 절연유를 사용하여 동일한 조건으로 온도를 증가시키면서 전기용량 센서를 사용하여 각 시료에 대해 측정된 결과이다. 각 절연유의 열화정도를 판별하는 기준으로 신품 절연유에 대해서도 정전용량을 측정하였으며 측정에 사용된 각 시료에 대한 특성은 표 1과 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 신품 절연유(NMO)의 전기용량이 가장 낮게 나타났으며, 각 절연유의 열화패턴과 정도에 따라 전기용량이 증가함을 알 수 있었다.

본 실험에서 사용한 시료 중 광유의 경우 현장에서 약 15년간 운전된 변압기에서 채취한 시료(AMO-I, AMO-II)의 정전용량이 다른 요인에 의해 열화된 광유들에 비해 가장 높게 나타났는데, 이는 실운전 조건에서의 복합적인 열화기구의 영향으로 판단된다. 또한 신유를 수분열화시킨 시료(WMO)의 경우, 수분함량이 큰 시료가 전기용량이 보다 높게 나타났다. 그러나 가속열화시킨 시료(AAMO)에 비해 그 증가량이 비교적 크지 않은 것으로 나타났는데, 이는 단순한 수분열화보다 열스트레스에 의한 변압기 내부의 구성물간의 복합적인 열화와 산화현상이 시료의 비유전율 증가에 보다 크게 기여하는 것으로 사료된다.

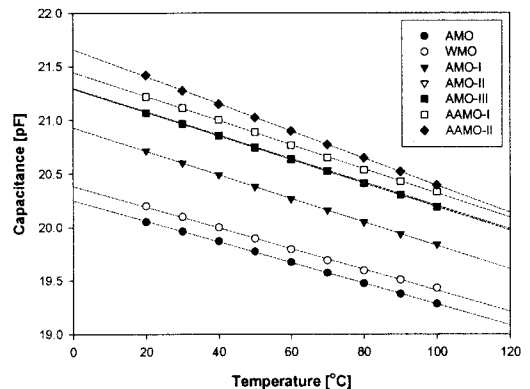


그림 6. 열화패턴과 온도에 따른 절연유에 대한 센서의 전기용량

Fig 6. Capacitance of sensor versus temperature and aged conditions in electrical insulating oils

## 4. 결 론

본 논문에서는 변압기용 전기 절연유의 열화진단을 위해 절연유의 비유전율 변화를 감지하는 전기용량 센서를 제안하였으며, 전산해석을 통해 최적화된 전극의 형태를 선정 후 시작품을 설계, 제작하였다. 또한 절연유의 열화 패턴에 따른 감지특성을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 정전용량형 센서는 시료의 온도에 대해 우수한 선형성을 보였으며, 재현성도 뛰어났다.
- 절연유가 열화된 패턴에 따라 온도증가에 따른 정전용량의 감소율이 조금씩 다른 것을 확인할 수 있었다.
- 광유의 경우, 수분열화시킨 시료의 수분함유량에 따라 감도 차이를 보이는 것을 확인할 수 있었다.
- 열에 의해 복합 열화된 경우 열화된 온도와 시간에 따라 감도 차이가 분명하게 나타났다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김주한, 한상욱, 최남호, 강전홍, 김한준, "전산해석을 통한 액체 유전체용 정전용량형 센서설계", 2003년도 대한전기학회 고전압 및 방전기술연구회 춘계학술대회, pp. 96-98, 2003. 5
- [2] 최남호, 김한준, 김주한, 한상욱, "전기절연유의 열화진단을 위한 정전용량 센서개발", 2003년도 대한전기학회 하계학술대회 Vol. C, pp 1609-1611, 2003. 7
- [3] 김주한, 김필환, 김재훈, 한상욱, 김한준, 이병성, "병렬 다층식 3단자 전극을 활용한 변압기용 전기 절연유의 열화감지 특성 평가", 2004년도 대한전기학회 고전압 및 방전기술연구회 춘계학술대회, pp. 69-71, 2004. 5
- [4] R.D. Lee, H.J. Kim, Yu. P. Semenov, "Precise Measurement of the Dielectric Constants of Liquids Using the Principle of Cross Capacitance", IEEE Trans., Instrumentation and Measurement, Vol. 50, No. 2, pp. 298-301, April, 2001
- [5] 이래덕 김한준, 서희원, Yu. P. Semenov, "전기용량 측정에 의한 자동차 엔진오일 열화상태 분석연구", 새물리 Vol. 42, No. 4, pp. 216-220, 2001. 4
- [6] 이래덕, 김한준. P. Semenov, "크로스 커패시턴스 원리를 이용한 액체의 유전상수 정밀측정", 새물리 Vol. 40, No. 2, pp. 97-102, 2000. 2
- [7] W. C. Heerens, "Application of Capacitance Techniques in Sensor Design", J. Phys. E:Sci. Instrum, Vol. 19, pp.897-905, 1986
- [8] W. C. Heerens, "Basic Principles in designing highly reliable multi-terminal capacitor sensors and performance of some laboratory test model", Sensors and Actuators A, pp. 137-148, 1982/83
- [9] ASTM designation D924-82b, A-C loss characteristic and relative permittivity (dielectric constant) of electrical insulating liquids, 10.3, pp. 142-151
- [10] IEC Publication 247, 1978. Measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor and dc resistivity of insulating liquids, Bureau Central de la Commission Electrotechnique International, Geneve, Suisse.

이 논문은 산업자원부에서 시행하는 대학전력연구센터  
육성 지원사업에 의해 작성되었습니다.