

전기절연유의 열화진단을 위한 정전용량 센서개발

최남호*, 김한준*, 김주한**, 김호수**, 한상욱**
한국철도기술연구원*, 한국표준과학연구원*, 충남대학교**

Development of Capacitive Sensor for the Diagnosis of Electrical Insulating Oil

N.H. Choi*, H.J. Kim*, J.H. Kim**, H.S. Kim**, S.O. Han**
KRII*, KRIS*, Chungnam Nat'l Univ.**

Abstract - This paper presents the results on the development of capacitive sensor for the diagnosis of electrical insulating oil, widely used for power transformer. To survey the dielectric properties of the new and used mineral insulating oil, we utilized the highly precise measuring system of KRIS. And the results were used to determine the design factors of the sensor. To evaluate the operational and the hysteresis characteristics of the sensor, we constructed a test chamber, including dielectric property measuring system. Through the results, we could confirm the superior characteristics of the newly developed sensor.

1. 서 론

전기절연유(Electrical Insulating Oil)는 변압기, 차단기, 케이블 등을 비롯한 각종 전력기기의 절연재료로서 널리 활용되어 왔으나, 가스절연개폐장치(GIS) 등과 같은 중요 전력설비를 중심으로 전기절연유에 비해 전기적 특성이 매우 우수한 기체절연재료(SF₆)의 적용이 확대되고 있으며, 중소용량의 전력용 변압기를 중심으로 전기절연유에 비해 중량이 매우 작고, 취급이 용이한 고체절연물의 적용이 증대되고 있다. 그러나, 전기절연유 고유의 경제적 이점으로 인하여 대부분의 전력설비에는 여전히 광유(Mineral Oil)를 비롯한 각종의 합성유(Synthetic Oil)가 사용되고 있다.

과거 우리나라의 전력산업은 산업규모의 급속한 팽창에 따라 양적 성장에 편중되어 있었으나, 산업의 고도화와 생활수준의 향상 등으로 인하여 전력공급의 안정성 및 전력의 품질 등에 대한 요구가 급격히 증대되고 있다. 국외 선진국의 경우 이와 같은 추세에 부응하기 위하여 사후정비(Breakdown Maintenance), 시간기준정비(Time Based Maintenance) 등으로 대변되던 기존의 유지보수 시스템에 예방정비(Preventive Maintenance), 예측정비(Predictive Maintenance), 상태기준정비(Condition Based Maintenance) 등의 개념이 도입된 바 있다.

그러나, 우리나라의 경우 일부의 초대형의 발전기, GIS, 변압기 등에 대해서만 제한적으로 선진국형의 유지보수 시스템이 적용되고 있는 실정이며, 대부분의 전력설비는 여전히 기존의 유지보수 시스템 하에서 운영되고 있다.

이와 같은 특성에 대한 이해를 바탕으로 주요 선진국을 중심으로 전기절연유의 열화진단을 위한 다양한 기법을 개발하여서 사용 중에 있다. 기존의 전기절연유 열화진단기법으로는 가압온전상태 하에서 별도의 전기절연유 진단용 센서를 활용하는 온라인진단기법과 정전상태 하에서 전기절연유의 각종 특성을 측정·평가하는 정전진단기법 그리고 절연유의 특성에 영향을 미치지 않는 특정한 방법을 통해 채취된 절연유 시료에 대하여 내전압,

산가(Acid Number), 수분함량, 제적저항을 등을 측정하고 그 결과를 바탕으로 열화여부 및 정도를 진단하는 채취시험기법 등이 있다.

과거 우리나라의 경우 대부분 정전시험기법을 정기적으로 적용하여 왔으나, 절연유의 산가와 잔존 절연과파 전압과의 상관관계를 활용한 전산가(Total Acid Number) 킷의 개발로 인해 고가의 장비나 관련분야의 전문가가 없는 경우에도 채취된 절연유의 열화여부를 진단할 수 있게 되었으며, 누설전류와 잔존 절연과파 전압 간의 상관관계를 활용한 PCS(Porous Ceramic Sensor) 센서의 개발로 인해 일부의 중요 설비에 적용중인 전기절연유의 경우 온라인진단기법이 적용되고 있다.

그러나, 전산가 킷의 경우 드레인 흡이 없는 중소형 변압기의 경우 적용이 사실상 불가능한 특성을 지니고 있으며, PCS 센서를 활용한 진단기법은 경제적 측면에 있어 단점을 지니고 있다.

이에 본 연구에서는 절연유의 경년열화와 비유전율간의 상관관계를 활용하여 기존의 진단시스템에 비해 그 정확도와 매우 높고 경제적인 측면에 있어서도 비교우위를 점할 수 있는 정전용량형 전기절연유 진단센서를 개발하여, 국내의 전력기기 예방진단기술의 발전은 물론 전력기기 유지보수 시스템의 선진화에 기여하고자 하였다.

2. 실 험

2.1 전기절연유(광유)의 비유전율

KS C 2301 전기절연유(Electrical Insulating Oil)는 1종(광유) 및 2종(알킬벤젠), 3종(폴리부텐), 7종(광유, 알킬벤젠) 등에 대해서는 비유전율을 제시하고 있지 않으며, 정전용량은 전극의 형상 및 배치 그리고 유전체의 비유전율 등에 따라 결정된다.

본 연구에서는 경년열화에 따른 전기절연유의 비유전율 특성을 조사·분석하기 위하여 Cross Capacitance의 원리를 이용한 한국표준과학연구원의 고정밀 정전용량 측정시스템을 활용하여 장기간에 걸쳐 사용된 주상변압기의 1종 광유에 대한 비유전율을 측정하였다.

그림 1은 사용기간에 따른 전기절연유 1종 광유의 비유전율 변화추이를 제시하고 있다. 장기간에 걸쳐 사용된 전기절연유를 확보함에 있어 각종의 제약으로 인하여 시료의 수가 미사용 시료를 포함하여 6개에 불과하였으나, 부하조건에 따른 경년열화조건이 상이함에도 불구하고 비교적 선형적인 특성을 나타내었다.

23 ± 0.2 °C의 조건에서 측정된 미사용 1종 광유의 비유전율은 2.04로 KS C 2301에서 제시된 4종(알킬나프탈렌) 및 5종(알킬디페닐에탄), 6종(실리코유) 등의 비유전율(2.50 ± 0.05)에 비해 매우 낮은 특성을 나타내었다. 그러나, 이는 측정온도 등의 조건이 매우 상이한 경우에 있어서의 측정결과이므로 직접적인 비교를 통한 평가는 적절하지 않은 것으로 판단된다.

한편, 동일한 조건에서 약 200여 개월에 걸쳐 사용된

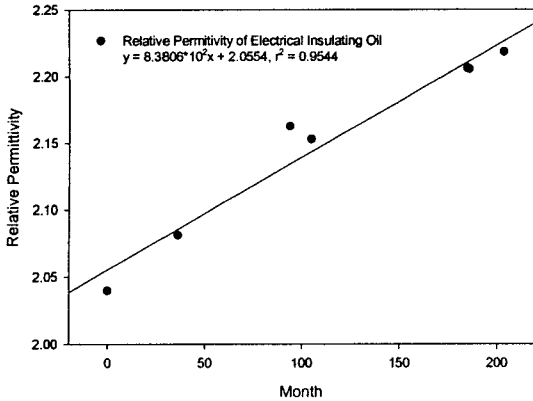


그림 1. 경년 열화에 따른 변압기용 전기절연유(1종 광유)의 비유전율

Fig 1. Dielectric constant of electrical insulating oil(Mineral oil #1)for power transformer with aging

1종 광유의 비유전율을 측정된 결과 미사용 시료에 비해 약 10% 증가한 값을 나타내었으며, 이와 비유전율의 증가 특성은 광유의 산화 및 이로 인한 산화물의 생성과 밀접한 관련성을 지니고 있을 것으로 추정된다.

2.2 정전용량 센서의 설계 및 제작

전기절연유용 정전용량형 센서를 개발하기 위해서는 상기의 10%에 해당하는 $\Delta \epsilon_r$ 값에 따른 ΔC 값을 적절히 선정할 필요가 있으며, 일반적인 경우 ΔC 값이 클수록 측정부를 구성하기 용이하지만, 동일한 구조를 가정할 때 ΔC 값을 크게 하기 위해서는 센서의 크기가 커지는 상보적 특성을 지니게 된다.

이에 본 연구에서는 정전용량을 위한 정밀측정회로와 관련된 국내외의 연구사례에 대한 조사 분석을 통하여 Ferry N. Toth 등의 연구결과 300 ms의 시간 이내에 50 aF 분해능으로 정전용량의 측정이 가능함을 확인할 수 있었다.

전기절연유의 열화정도를 진단·평가하기 위한 정전용량형 센서의 개발을 위하여 전산해석기법을 활용하여 전극의 형상 및 배치가 센서의 정전용량에 미치는 영향을 조사·분석하였으며, 그 결과를 통해 그림 2와 같이 3단자형 정전용량 센서를 최적의 형태로 선정하였다.

그림 2와 같은 같이 가드링 전극을 지닌 3-단자 전극구조에서 전극의 edge correction을 첨가하면, $s \ll d_0 \ll R_i \ll R_0$ 일 때 전기용량 C_0 는 식(1)과 같이 표현된다.

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

$$= \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r R_i^2}{d_0}$$

where, s is the interval between E_2 and guard
 d_0 is the interval between the E_1 and E_2
 R_0 is the external radius of E_1 and guard
 R_1 is the radius of E_2
 R_i is the half of electrical length, $R_1 + s/2$

그러나 실제로 사용되는 가드링 전극은 가드링과 측정 전극의 크기가 무한하게 클 수 없고 일정크기로 제한되

기 때문에 식(1)에서 요구하는 이상적인 조건과 일치되지 않지만, R_0 와 R_1 의 차이가 d_0 의 약 5배 이상일 때에만 식(1)에 의한 전기용량값과 근사적으로 일치한다.

그림 3은 이상과 같은 일련의 이론적 고찰 및 분석을 통하여 제작된 센서의 외관을 보이고 있다.

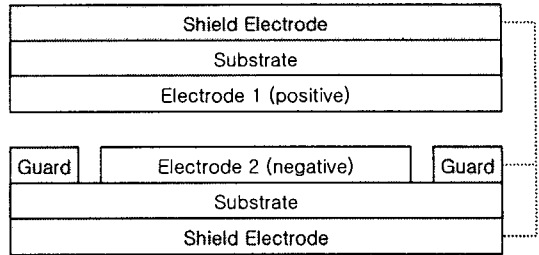
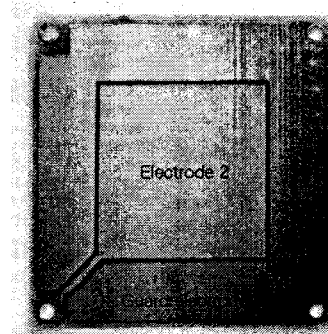
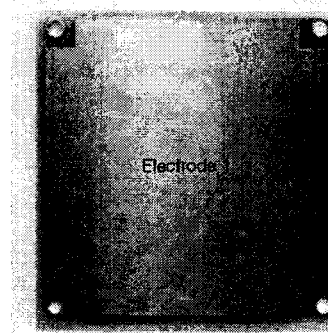


그림 2. 변압기용 전기절연유의 열화진단을 위한 3단자형 정전용량센서의 구조

Fig 2. Structure of 3 terminal capacitive sensor for the diagnosis of electrical insulating oil for power transformer



(a) Electrode 2 (negative) and Guard



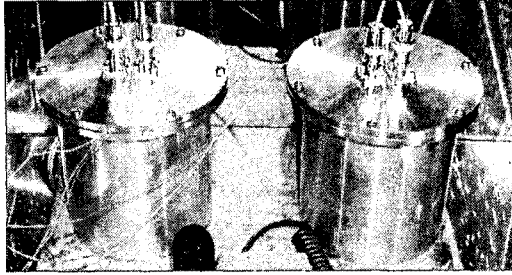
(b) Electrode 1 (positive)

그림 3. 변압기용 전기절연유의 열화진단을 위한 3단자형 정전용량센서의 시제품

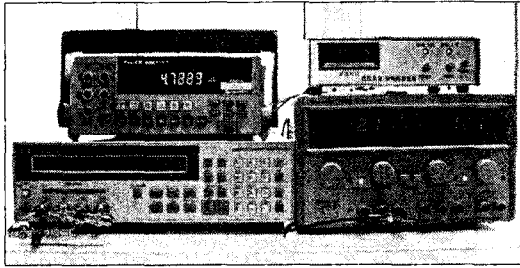
Fig 3. Prototype of 3 terminal capacitive sensor for the diagnosis of electrical insulating oil for power transformer

2.3 정전용량 센서의 특성평가

그림 4는 본 연구를 통해 개발된 전기절연유 열화진단용 정전용량 센서의 특성평가를 위한 실험장치의 외관을 보이고 있다.



(a) oil chamber (located in oven)



(b) power supply & meters (LCR meter, DVM and etc.)

그림 4. 정전용량 센서 시작품의 특성평가를 위한 시험 장치의 외관

Fig 4. Photograph of testing equipment to evaluate the characteristics of the prototype capacitive sensor

정전용량 센서의 특성평가를 위한 실험에 있어 전극에는 12 ± 0.1 V의 직류 전압을 인가하였으며, 실제의 전력용 변압기의 유온을 감안하여 30 ~ 130 °C의 온도구간을 선정하고 신뢰성 확보를 위하여 반복 실험을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 5는 이상과 같은 일련의 연구과정을 거쳐 도출된 전기절연유의 열화진단을 위한 정전용량 센서의 정적 온도 히스테리특성을 제시하고 있다.

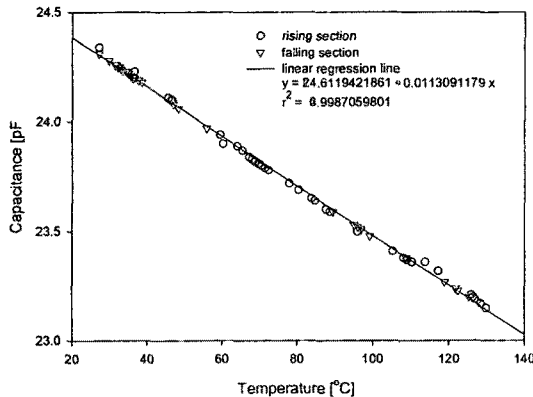


그림 5. 전기절연유의 열화진단을 위한 정전용량 센서 시작품의 정적 온도 히스테리특성

Fig 5. Static temperature hysteresis characteristics of prototype capacitive sensor to diagnose the aging of electrical insulating oil

그림 6은 이상과 같은 일련의 연구과정을 거쳐 도출된 전기절연유의 열화진단을 위한 정전용량 센서의 정적 온도 히스테리 특성에 따른 유전손실 값을 제시하고 있다.

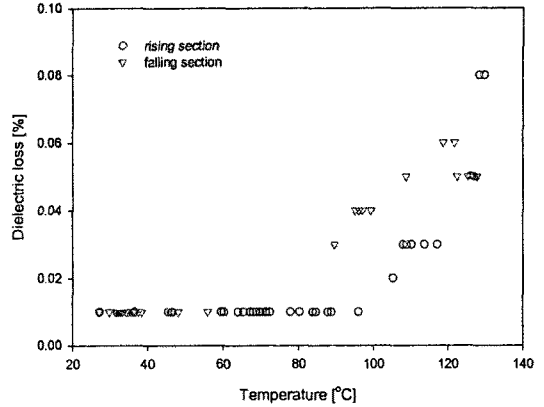


그림 6. 시작품 센서를 통해 측정된 온도변화에 따른 전기절연유의 유전손실 값

Fig 6. Dielectric loss of electrical insulating oil with the change in temperature, measured with prototype sensor

그림 5를 통해 제시한 바와 같이 본 연구를 통해 개발된 정전용량 센서는 매우 우수한 온도 이력특성을 나타내었으며, 측정결과와 선형적 분포 특성을 고려할 때 본 연구를 통해 분석되지 않은 30°C 이하 및 130°C 이상의 온도 영역에 있어서도 우수한 특성을 나타낼 것으로 추정된다.

3. 결 론

변압기, 차단기, 콘덴서, 케이블 등과 같은 다양한 전력기기의 절연재료로서 널리 사용되고 있는 전기절연유의 경년열화 진단을 위한 정전용량센서의 개발을 위한 본 연구를 통하여 기 사용된 전기절연유의 경년 열화특성을 조사·분석하고, 전산해석 프로그램을 활용하여 최적의 정전용량 센서를 설계 및 제작하였으며 이에 대한 평가를 위한 실험을 통하여 그 특성의 우수함을 정량적으로 확인할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김재철 외, "전력용 변압기 절연유의 비파괴 진단시험법의 비교연구", 대한전기학회학회논문지, Vol.40, No.3, pp.799-807, 1991.8.
- [2] 이래덕, 김한준, 서희원, Yu. P. Semenov, "전기용량 측정에 의한 자동차 엔진오일 열화상태 분석연구", 새물리 Vol.42, No.4, 2001
- [3] 이래덕, 김한준, Yu. P. Semenov, "크로스 커패시턴스 원리를 이용한 액체의 유전상수 정밀측정", 새물리 Vol. 40 No.2, pp.97-102, 2000
- [4] W. C. Heerens, "Application of Capacitance Techniques in Sensor Design", J. Phys. E:Sci. Instrum, Vol. 19, pp.897-905, 1986
- [5] Ferry N. Toth, etc. "A Very Accurate Measurement System for Multielectrode Capacitive Sensors", IEEE Trans. Vol. 45, No. 2, April, 1996

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라구축지원사업으로 수행된 논문입니다.