

전기용량형 센서를 이용한 변압기 절연유 열화진단용 예방진단기법 개발

김주한\*, 한상옥\*  
충남대학교\*

Development of Preventive Diagnosis Techniques for Transformer Oil by Capacitive Sensor

Ju-Han Kim\*, Sang-Ok Han\*  
Chungnam National University\*

**Abstract** - Within serviced period of time in transformer, thermal stress is the most influential parameter affecting the aging behavior of an insulation system. The thermal stress on the insulation system may occur from operation in a high temperature environment due to Joule's heat at winding coils. This paper describes a development of capacitive sensor and preventive diagnosis techniques for electrical insulating oil, widely used for power and distribution transformer. To survey the dielectric properties of the virgin and used mineral insulating oil, we utilized the highly precise measuring system of KRISS. And the results were used to determine the design factors of the sensor. To evaluate diagnosis by the sensor, we performed accelerated aging test about insulating oils. The condition of aged specimens were investigated by measurements of relative permittivity i.e. capacitance change by capacitive sensor.

2. 본 론

2.1 경년열화에 따른 변압기 절연유의 비유전율

전기 절연유와 같은 액체 유전체는 사용 중 다양한 전기적, 화학적, 환경적 스트레스로 인해 열화가 진전됨에 따라 유전체의 고유한 특성인 유전율이 변화하게 된다. 또한 교류전압 하에서 유전체에서 발생하는 전력손실, 즉 유전손실(Dielectric Loss)은 식 (1)과 같이 절연체의 유전정접(tanδ)과 비유전율, 주파수에 비례하며 이는 유전체 분극에 의한 단위 체적당 전력 소모로서 유전체를 구성하는 분자들 간의 충돌로 인한 단위 시간당 에너지 손실을 의미한다. 특히 비유전율은 전계 하에서 모든 종류의 기구에 의하여 발생하는 유전 분극에 의해 결정되는 특성이므로 절연체료가 양호할 경우 유전손실이 매우 적으나 열화에 의해 수분, 불순물 등이 형성되면 유전손실이 증가하는 것으로 알려져 있다.

$$W_{loss} = \omega E^2 \epsilon_0 \epsilon_r \tan \delta \tag{1}$$

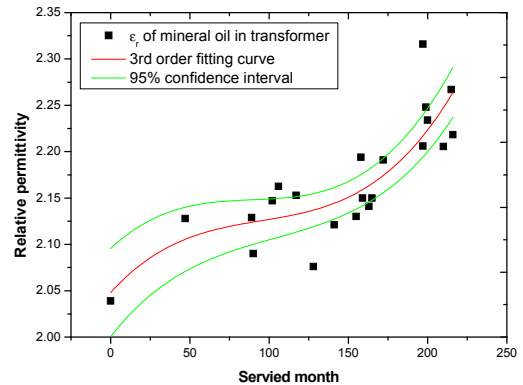
1. 서 론

오늘날 전력수요는 전세계적으로 지속적으로 증가하고 있으며, 이로 인해 전력계통을 이루고 있는 각종 전력기기들은 초고압, 대용량화되는 추세이므로 계통이 확장됨에 따라 대용량화된 변압기가 부담하는 공급 지역이 넓어져 변압기의 고장사고 발생 시 정전구역이 광범위해지며, 이로 인한 경제적 손실과 과급효과 역시 증가할 수밖에 없다. 따라서 전력계통을 구성하고 있는 각종 전력기기들의 안정성 확보 및 신뢰도 향상이 절실히 요구되고 있으며, 전력설비의 기능 및 성능을 충분히 확보하고 고장사고를 미연에 방지하기 위한 유지보수 및 예방진단의 필요성이 점차 부각되고 있다. 전력계통을 이루고 있는 배전계통 전력설비의 고장 중 상당부분이 변압기의 고장사고로부터 기인하는데, 변압기 사고는 대부분 사용 중에 내부 절연재료의 열화가 진전됨에 따라 절연성능이 저하하여 결국 절연파괴로 이어지므로, 열화된 변압기를 적시에 교체하거나 보수하기 위해 변압기의 절연열화를 조기에 진단할 수 있는 예방진단시스템을 구축하는 것이 중요하다.

국내에서 사용하고 있는 변압기의 대부분은 유입식 변압기이며, 유입식 기기의 주 절연재료는 전기 절연유와 층간 절연지로 이루어져 있다. 특히 전기 절연유는 권선 발열을 냉각하기 위한 역할뿐만 아니라 절연유에 함침된 절연지와 함께 복합 절연을 구성함으로써 전기적 절연을 수행하고 있다. 그러나 절연유는 운전 중 온도, 수분, 산화, 부분방전 등의 각종 전기적, 화학적 스트레스에 의해 열화되며, 결국 절연 및 냉각 성능이 현저히 저하하여 사고에 이를 수 있다. 일반적으로 절연유는 열화가 진전됨에 따라 절연파괴전압, 전산가, 체적저항, 산화안정도, 점도, 인화점, 비색도, 유전정접, 유증가스, 수분함유량 등이 변화하게 되는데, 이러한 특성들을 측정함으로써 절연유의 열화여부를 판별하고 있다. 그러나 위와 같은 진단 기법들은 현재 기기를 전원과 분리한 후 사전 상태로 진단하거나 절연유를 채취하여 시험하는 것이 대부분으로 사후정비(Breakdown Maintenance), 시간기준정비(Time Based Maintenance) 등과 같은 종래의 유지보수시스템을 고수하고 있으므로 사고를 미연에 방지하는 것이 어려운 실정이다. 또한 시료 채취 및 보관 중 필연적으로 발생하는 시료의 상태 변화뿐 아니라 분석에 장시간이 소요되며 분석에 필요한 고가의 시험장비와 전문 인력이 요구되는 한계점을 가지고 있어 경제성, 신뢰성면에서 충분히 만족할 만한 진단기법을 개발하기 위해 수많은 연구가 진행되고 있다.

따라서 본 논문에서는 근래 그 중요성이 부각되고 있는 예방정비(Preventive Maintenance), 예측정비(Predictive Maintenance), 상태기준정비(Condition Based Maintenance) 등의 개념을 전력설비 유지보수시스템에 도입함으로써 운전 유입식 변압기 절연유의 열화상태에 따른 유전특성의 변화를 상시적으로 진단 및 감지하여 사고를 미연에 사고를 방지할 수 있는 진단센서 및 절연유 열화와 유전특성간의 상관관계를 활용한 예방진단기법을 개발하고자 하였다.

따라서 본 연구에서는 경년열화에 따른 전기 절연유의 비유전율 특성을 조사 및 분석하기 위해 충남전역에서 실제로 운전되었던 배전용 주상 변압기에서 이십여 개의 전기 절연유(제1종 2호, 광유)를 채취하여 비유전율을 측정하였다. <그림 1>은 사용기간에 따른 광유의 비유전율의 경년변화를 나타내고 있다. 변압기들의 공급지역에 따른 부하율과 주의환경 등의 운전조건이 상이함에도 불구하고 사용기간에 따라 절연유의 비유전율이 지속적으로 증가하였으며, 측정결과에 따르면 열화된 시료의 비유전율은 신품대비 최대 11.5% 이상 증가하는 것으로 나타났다.

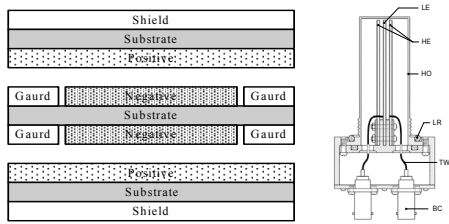


<그림 1> 운전기간에 따른 배전용 변압기 절연유의 비유전율

2.2 전기용량형 센서의 설계

저자의 선행연구를 통해 실사용 변압기용 전기 절연유의 비유전율 측정결과를 바탕으로 전산해석기법을 활용하여 전극의 형상 및 배치, 측정용 전극의 대향면적 및 극간 거리가 센서의 전기용량에 미치는 영향을 조사, 분석하였으며[1], 그 결과를 통해 <그림 2>과 같은 가드 전극을 지닌 3단자 전극구조의 센서를 최적 형태로 선정하여 설계 및 제작하였다. 센서를 변압기 내부에 취부하는 경우를 고려하여 부피를 최소화하면서도 큰 전기용량을 확보할 수 있도록 두 쌍의 측정전극을 병렬구조로 배열하였으며, 전극 단부의 end effect를 최소화하기 위해 negative 전극(LE) 주변으로 가드전극을, 변압기 내부의 전자계 영향을 최대한 배제하기 위해 positive 전극(HE)의 배면에 차폐용 전극을 배치하고 이를 외부 하우징과 연결함으로써 이중의 정전차폐 구조를 가지도록 구성 하였

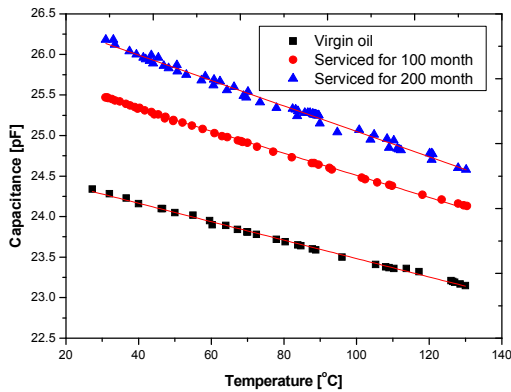
다. 전극부의 외부 하우징은 절연유의 원활한 순환이 가능한 구조로 제작하였다.



〈그림 2〉 3전극형 전기용량 센서

### 2.3 전기용량 센서 및 절연유의 온도이력특성

변압기는 사용 중 부하변동 및 기후 등에 의해 절연유 온도가 변화하므로 절연유 신품과 실사용품을 대상으로 절연유의 온도를 변화시켜 〈그림 3〉과 같은 결과를 도출하였다.[2] 측정결과, 사용기간이 늘어날수록 경년열화에 의해 비유전율이 증가하여 전기용량이 열화정도에 따라 차이를 보이고 있으며, 온도에 따른 절연유 부피팽창으로 인한 밀도 저하로 온도가 증가함에 따라 유전율이 매우 선형적으로 감소하는 것으로 나타났다. 또한 온도변화에 따른 센서의 이력특성 및 재현성 역시 우수한 것으로 판단된다.



〈그림 3〉 전기용량 센서 및 절연유 신품 및 사용품의 온도이력특성

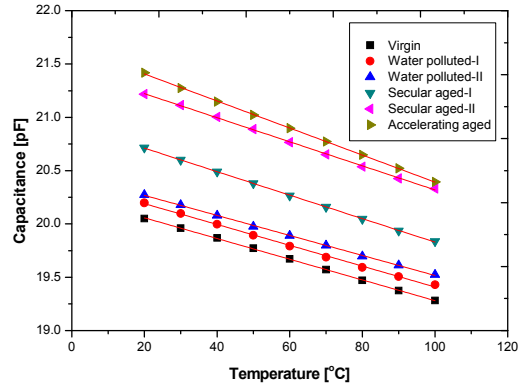
### 2.4 전기용량 센서의 열화진단 특성

다양한 조건으로 열화된 절연유와 절연유 종류별 열화진단 특성을 확인하기 위해 <표 1>과 같은 절연유를 대상으로 시험을 실시하였다. 피 측정된 절연유는 광유(제1종 2호)와 식물유(Biotrans 5000, ERNCO)로 각각 신품, 실사용된 경년열화시료, 가속열화시료, 임의로 수분을 주입한 시료에 대해 LCR meter를 활용하여 측정 주파수 10kHz에서 온도에 따른 이력특성 및 전기용량 변화를 확인하였다.

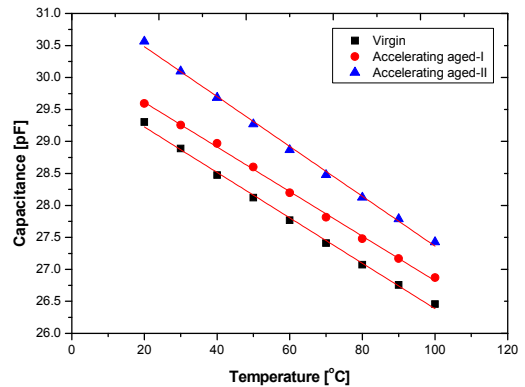
<그림 4>와 <그림 5>는 제작된 센서를 통해 온도에 따른 열화조건별, 절연유 종류별 전기용량 변화를 취득한 결과를 나타내고 있다. 광유의 경우, 절연유의 열화 또는 수분 함유량에 따라 전기용량이 증가하였으며, 실제 현장에서 15년 정도 사용한 변압기 절연유는 복합적인 열화요인으로 인해 가장 높은 전기용량을 보였다.

〈표 1〉 열화조건 및 절연유 종류의 물성

Insulating oil type/ Aging condition	Moisture contents (ppm)	Breakdown voltage (kV)
virgin	11.2	52.0
Mineral oil	Water Polluted-I	21.9
	Water Polluted-II	213.8
	Secular aged-I	31.5
	Secular aged-II	47.7
	Accelerating aged(130°C,960h)	21.0
Vegetable oil	virgin	306.3
	Accelerating aged-I(130°C,960h)	334.4
	Accelerating aged-II(140°C,960h)	176.9



〈그림 4〉 절연열화에 따른 광유의 전기용량 변화



〈그림 5〉 절연열화에 따른 식물유의 전기용량 변화

식물유에 대한 측정결과 역시 열화조건이 가혹할수록 전기용량이 증가하였으며, 광유에 비해 열팽창이 심한 특성으로 인해 온도가 증가함에 따라 유전율의 감소율이 큰 것으로 나타났다. 또한 열화 식물유의 경우, 수분함유량에 비해 열 스트레스가 가혹한 시료의 전기용량이 보다 큰 것으로 나타났다.

## 3. 결 론

본 연구에서는 수행된 연구결과를 바탕으로 변압기용 전기 절연유의 열화 진단을 위해 유전체 고유의 성질인 비유전율의 변화를 감지할 수 있는 전기용량형 센서를 설계 및 제작하였으며, 변압기 절연유의 종류별 열화현상 감지 특성을 측정하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 변압기용 전기 절연유는 다양한 요인에 의한 절연열화에 따라 비유전율이 지속적으로 증가하는 특성을 보이고 있으며, 센서의 전기용량을 적절히 선정하면 충분히 진단이 가능한 범위로 판단된다.
- 10kHz의 측정 주파수에서 절연유에 유입된 수분 열화에 비해 열 스트레스에 의해 열화된 절연유의 경우 열화된 온도와 시간에 따라 전기용량 차이가 극명하게 나타나는 것으로 보아 열열화에 대한 열화진단감도가 우수할 것으로 판단된다.

## [참 고 문 헌]

[1] 김주한, 한상욱, 최남호, 강전홍, 김한준, "전산해석을 통한 액체 유전체용 정전용량형 센서설계", 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] W. C. Heerens, "Application of Capacitance Techniques in Sensor Design", J. Phys. E:Sci. Instrum, Vol. 19. pp.897~905, 1986

## 감사의 글

이 논문은 2008년도 충남대학교 학술연구비의 지원에 의해 연구되었음.