2004년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2004.7.14-16

전기 절연유의 열화 패턴에 따른 정전용량형 센서의 열화감지특성 평가

김주한*, 김재훈*, 이원영*, 김필환*, 한상옥*, 김한준**
충남대학교*, 한국표준과학연구원**

Evaluation of Diagnosis Properties of Capacitive Sensor about Deteriorated Pattern of Electrical Insulating Oil

Ju-Han Kim*, Jae-Hoon Kim*, Won-Yeong Lee, Pil-Hwan Kim*, Sang-Ok Han*, Han-Jun Kim**
Chungnam National University*, Korea Research Institute of Standards and Science**

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.

1. 서 론

경제성장에 따른 전력수요는 지속적으로 증가하고 있으며, 이로 인해 전력계통을 이루고 있는 전력기기들은 초고압화, 대용량화되는 추세이다. 하지만 전력계통이 확장되면서 대용량화된 변압기가 부담하는 공급지역이 넓어짐에 따라 사고 발생시 정전구역이 광범위해지며, 이에 따른 파급효과로 인해 경제적 손실 역시 증가하게 된다. 따라서 전력계통을 구성하고 있는 각종 전력기기들의 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, 유전정접, 유중가스 등에 영향을 미치므로 이러한 특성들을 측정하면 열화의 정도를 판별함이 가능하다. 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), 상태기준정비(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 열화진단센서로서의 적용성을 확인하기 위해 우선 한국표준과학연구원의 크로스 캐패시턴스 원리를 활용한 고정밀 정전용량 측정장비를 이용하여 주상변압기에서 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.

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($\Delta\varepsilon_r$), 즉 정전용량의 변화량(ΔC)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 150-81과 IEC 250에서 제시하고 있는 고체 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], $s<<do<<Ri<<Ro$ 일 때 정전용량 Co 는 식(1)과 같이 표현된다.

$$C_0 = \frac{\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r}{d_0}\left(R_1 + \frac{s}{2}\right)^2 = \frac{\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r R_i^2}{d_0} \qquad (1)$$

where, Ri=R1+s/2

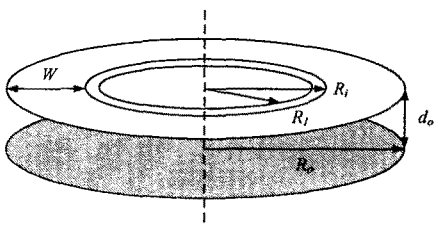

그림 1. 3단자형 원형전극의 구조
Fig 1. A circular 3-terminal electrodes

이러한 선행연구결과[1,4,5,6]들을 바탕으로 미세한 정전용량 변화를 측정할 수 있는 가드링 전극을 적용한 3단자 전극구조의 정전용량형 센서를 제작하였다.

그림 2는 3단자 전극을 응용하여 제작한 센서의 구조를 나타내고 있으며, 그림 3은 본 연구를 통해 제작된 정전용량형 센서의 시작품을 보이고 있다. 변압기 내부에 취부할 경우를 고려하여 센서의 면적을 줄이면서 기존의 정전용량을 확보할 수 있는 방법으로 병렬구조로 제작하였다. 또한 leakage flux와 fringing flux를 최소화하기 위해 negative 전극을 둘러싼 가드전극 이외에도 positive 전극의 배면에 쉴드전극을 적용하여 이중 정전쉴드를 구성하여 변압기 내부의 전자계 영향이나 외부 노이즈를 최대한 배제함으로써 안정한 정전용량을 취득할 수 있도록 제작하였다.

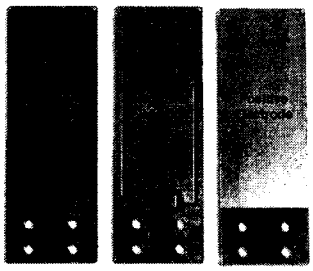

그림 2. 3단자 전극의 구조
Fig 2. Construction of 3-terminal electrodes

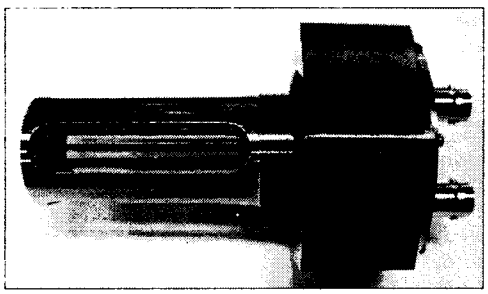

그림 3. 정전용량형 센서의 시작품
Fig 3. Prototype of capacitive sensor

2.2 실험장치의 구성

절연유에 대한 센서의 감지 특성을 평가하기 위해 시험용 셀을 제작하였다. 셀 내부의 절연유 온도는 Vaccum Drying Oven(SVO-401, 신생)을 이용하여 제어하였으며, 셀 내부에 온도센서(RTD-100Ω)를 삽입하여 절연유의 온도가 일정 온도로 포화되었을 때 센서의 정전용량을 측정하였다. 실제 현장에서 운전되는 변압기 내부의 절연유 온도를 감안하여 20~100℃의 온도 구간에 대해 센서의 특성을 평가하였다.

센서의 정전용량은 LCR meter(HP4284A, Agilent)를 사용하였으며, 측정용 신호선은 노이즈 차폐를 위해 BNC 케이블(RG-178)을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 사용기간에 따른 절연유의 비유전율 특성

절연재료에 교류전압을 인가하였을 때 발생하는 전력손실인 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.

위와 같은 유전체의 유전특성을 감안하여, 한국표준과학연구원의 고정밀 정전용량 측정시스템을 통해 공급지역이 서로 다른, 장시간에 걸쳐 운전된 주상 변압기의 절연유를 채취하여 비유전율을 측정하였다.

그림 4는 사용기간에 따른 광유의 비유전율의 변화추이를 제시하고 있다. 변압기들의 공급지역이 서로 다르므로, 부하율과 공급환경 등의 운전조건이 상이하였음에도 불구하고 사용기간이 늘어남에 따라 비유전율이 증가하는 추세를 확인할 수 있었다.

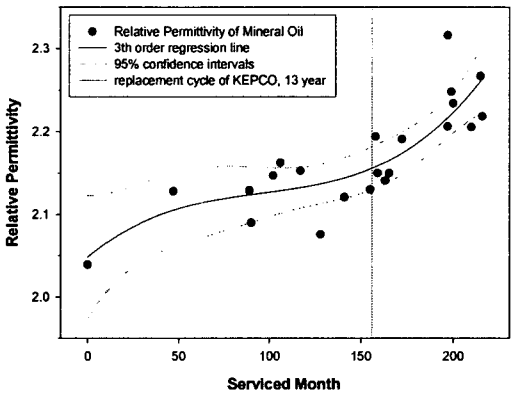

그림 4. 사용기간에 따른 광유의 비유전율
Fig 4. Relative permittivity of mineral oils versus serviced months

3.2 시료의 종류 및 조건과 전기적, 화학적 특성

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

구분		기호	수분 함유량 (ppm)	절연파괴 전압 (kV)
종류	조건			
광유	신유	NMO	11.2	52.0
	수분열화	WMO-Ⅰ	21.9	42.7
		WMO-Ⅱ	213.8	10.0
	현장사용	AMO-Ⅰ	31.5	46.8
		AMO-Ⅱ	47.7	48.7
	가속열화	AAMO	21.0	38.4
식물유	신유	NMO	306.3	50.4
	가속열화	AAVO-Ⅰ	334.4	44.1
		AAVO-Ⅱ	276.9	45.0

※ AAMO : 130℃, 960h
AAVO-Ⅰ : 130℃, 960h
AAVO-Ⅱ : 140℃, 960h

본 연구에서는 변압기용 절연유의 주류를 이루고 있는 광유(1종 2호, 현대 화학)와 최근 국외에서 점차적으로 사용을 확대하고 있는 식물유(BioTrans 5000, ERMCO)에 대해 센서의 측정 감도를 평가하였다.

광유는 신품과 가속열화된 시료 이외에 신유의 수분함유량을 달리한 시료와 현장에서 약 15년간 사용된 시료를 사용하였다.

가속열화시킨 시료는 가속열화시험셀 내부에 50KVA급 변압기에 사용되는 재료와 유사한 비율로 절연지와 절연유, 규소강판, 권선코일 등을 함침시킨 후 130℃와 140℃의 온도에서 960시간 동안 가열하였다.

실험에 사용된 광유와 식물유의 전기적, 화학적 특성은 표 1에 나타내었다. 시료의 절연파괴전압은 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.

3.3 절연유의 열화 패턴에 따른 센서의 감지특성

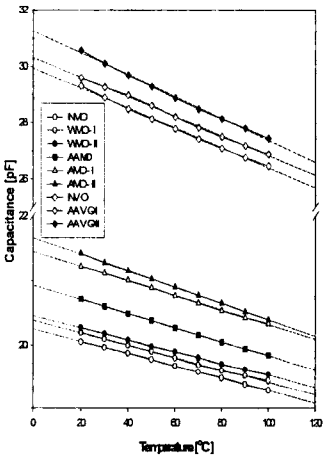

그림 5. 열화패턴과 온도에 따른 절연유에 대한 센서의 정전용량

Fig 5. Capacitance of sensor versus Temperature and aged conditions in electrical insulating oils

그림 5는 다양한 조건으로 열화된 절연유를 사용하여 동일한 조건으로 온도를 증가시키면서 정전용량형 센서를 사용하여 각 시료에 대해 측정한 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, NVO)의 정전용량이 가장 낮게 나타났으며, 각 절연유의 열화패턴과 정도에 따라 정전용량이 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-Ⅰ, WMO-Ⅱ)의 경우, 수분함량이 큰 시료가 정전용량이 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.

식물유의 경우, 광유에 비해 비유전율이 상대적으로 크므로 보다 큰 정전용량을 나타내고 있다. 또한 광유에 비해 온도 증가에 따른 정전용량의 감소율이 비교적 큰 것으로 나타났다. 시료의 수분함유량과 절연내력만을 고려해보았을 때 130℃에서 열화된 시료(AAVO-Ⅰ)가 보다 열화정도가 심할 것으로 판단할 수 있으나, 140℃에서 열화된 시료의 정전용량이 더 크게 나타난 것을 볼 때 고온운전에 따른 열스트레스로 인한 열열화 현상에 대해 우수한 감지특성을 가지고 있음을 의미하고 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 변압기용 전기 절연유의 열화진단을 위해 절연유의 비유전율 변화를 감지하는 정전용량형 센서를 제안하였으며, 전산해석을 통해 최적화된 전극의 형태를 선정 후 시작품을 설계, 제작하였다. 또한 절연유의 종류와 열화패턴에 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.
- 식물유의 경우, 광유에 비해 정전용량이 감소하는 기울기가 좀더 큰 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.
- 광유뿐만 아니라 식물유에 대해서도 우수한 감지 특성을 보였다.

[참 고 문 헌]

[1] 김주한, 한상옥, 최남호, 강전홍, 김한준, "전산해석을 통한 액체 유전체용 정전용량형 센서설계", 2003년도 대한전기학회 고전압 및 방전기술연구회 춘계학술대회, pp. 96 98, 2003. 5

[2] 최남호, 김한준, 김주한, 한상옥, "전기절연유의 열화진단을 위한 정전용량 센서개발", 2003년도 대한전기학회 하계학술대회 Vol. C, pp 1609 1611, 2003. 7

[3] 김주한, 김필환, 김재훈, 한상옥, 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

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라구축지원사업으로 수행된 논문입니다.