

변압기 절연유 검진용 전기용량 센서 개발

김한준*, 강전홍*, 김주한**, 한상옥*
 *한국표준과학연구원, **충남대학교 전기공학과

Development of A Capacitive Sensor for The Diagnosis of Electrical Insulating Oil

Kim Han Jun*, Kang Jeon Hong*, Kim Ju Han**, Han Sang Ok**
 *Korea Research Institute of Standards and Science, **Chung Nam Univ.

Abstract - 변압기에 사용되는 절연유의 열화정도를 변압기의 운전정지 없이 실시간으로 측정할 수 있는 전기용량을 이용한 센서를 개발하였다. 개발된 전기용량형 센서는 3-전극형의 구조와 변압기에 센서의 외부상자가 접지 될 때 2중의 정전차폐가 되도록 하여 외부로부터의 잡음에 영향을 받지 않도록 하였다. 또한 변압기에서 절연유의 온도변화에 따른 유전율 변화를 보상하기 위하여 기준용 센서와 측정용 센서를 한개의 변압기에 장착함으로써 온도보상이 되도록 하였다. 제작된 센서는 변압기에서 절연유의 사용기간에 따른 유전율의 변화를 정확히 측정하였으며, 절연유의 체적저항의 변화도 감지 할 수가 있다. 따라서 센서에서 출력되는 신호를 phase sensitive detector를 사용하여 유전율의 변화로 혹은 체적저항의 변화로도 나타내 보일 수가 있다.

다. 이와 같이 현재 변압기용 전기절연유의 열화판정 방법은 정전시험이 대부분이며, 일부 중요한 대용량 변압기에만 한정적으로나마 상시진단을 위한 여러 형태의 센서들이 활용되고 있다. 그러나 일부 센서의 경우 순수 국내 기술이 아님으로 인한 가격이 고가인 점, 온도에 따른 절연유의 전기적 특성 변화 보상이 쉽지 않은 점, 고전압을 인가해야 되는 점 등을 단점으로 들 수 있다.

2. 본 론

2.1 3-전극형 전기용량기 센서의 설계 및 제작

2.1.2 3-전극형 전기용량기 기본 이론

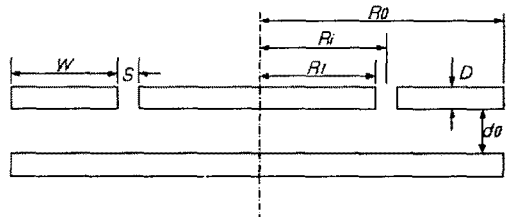


그림 1. 원형 3-단자 전극의 전기용량기.

그림 1과 같은 원형의 3단자 전극구조에서 전극의 edge correction을 고려하면, $s \ll d_0 \ll R_1 \ll R_0$ 이면, 전기용량 C_0 는 식(1)과 같다.

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

여기서, $R_1 = R_1 + \frac{s}{2}$ 이다.

그러나 실제로 사용되는 가드 링 전극은 측정 전극의 크기에 비교하여 무한하게 클 수 없어 일정크기로 제한되기 때문에 식(1)에서 요구하는 이상적인 조건과 일치되지 않지만, 가드 링의 외경(R_0)과 측정 전극의 반경(R_1)의 차이가 d_0 의 약 5배 이상이면 식(1)에 의해 계산된 전기용량 값과 실제 유도되는 전기용량 값은 수 ppm 이내로 일치하게 된다[1]. 한편 전기용량형 센서를 변압기 내에 설치할 경우 센서의 병렬등가회로는 그림 2와 같다.

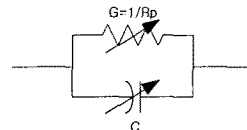


그림 2. 전기용량센서의 병렬등가회로

즉 절연유의 열화에 따라서 유전율이 변하고 유전율 변

1. 서 론

광유(Mineral Oil)를 비롯한 각종의 합성유(Synthetic Oil)는 고유의 우수한 전기절연성 및 경제성, 활용성 등의 장점으로 인하여 변압기, 차단기, 케이블 등을 비롯한 각종 전력기기의 절연재료로서 널리 사용되고 있다. 전력의 안정성 및 품질을 개선하기 위한 방안으로 사후정비(Breakdown Maintenance), 시간기준정비(Time Based Maintenance) 등과 같은 후진적 유지보수시스템에서 탈피하여, 예방정비(Preventive Maintenance), 예측정비(Predictive Maintenance), 상태기준정비(Condition Based Maintenance) 등의 개념을 전력설비 유지보수시스템에 도입하여야 한다. 그러나 우리나라의 경우 일부의 초대형 발전기, GIS, 변압기 등에 대해서만 유지보수 시스템이 적용되고 있으며, 대부분의 중소형 전력설비는 여전히 기존의 유지보수시스템 하에서 운영되고 있다. 국내에 도입되어 있는 기존의 전기절연유 열화진단기법은 가압운전 상태 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, 체적저항을 등을 측정하고 그 결과를 바탕으로 열화여부 및 열화정도를 진단하는 채취 시험기법 등으로 구분하여 살펴볼 수 있다. 과거 우리나라의 경우 대부분 정전시험기법을 정기적으로 적용하여 왔으나, 절연유의 산가와 잔존 절연과파 전압과의 상관관계를 활용한 전산가(Total Acid Number) 컷의 개발로 인해 고가의 장비나 관련분야의 전문가가 없는 경우에도 채취된 절연유의 열화여부를 진단할 수 있게 되었으며, 누설전류와 절연과파 전압간의 상관관계를 활용한 PCS(Porous Ceramic Sensor)센서의 개발로 인해 일부의 중요 설비에 적용중인 전기절연유의 경우 온라인진단 기법이 적용되고 있다. 그러나 전산가 컷의 경우 드레인 홀이 없는 중소형 변압기의 경우 적용이 사실상 불가능한 특성을 지니고 있으며, PCS 센서를 활용한 진단기법은 경제적 측면에 있어 단점을 지니고 있는 것이 사실이

화에 따라 전기용량 값이 변화한다. 또 절연유의 열화정도에 따라 절연유의 절연저항에 변화가 발생하게 되고, 이때 센서 전극을 타고 흐르는 누설전류에도 변화가 발생하게 된다. 따라서 전기용량형 센서는 외부 디스플레이 장치에 위상감지기(phase sensitive detector)를 적용함으로써 각각 전기용량변화와 절연유의 절연저항변화를 감지할 수도 있고, 혹은 2가지의 변화를 함께 감지할 수도 있게 된다.

2.1.2 3-전극형 전기용량 센서 설계제작

변압기절연유의 열화정도 및 급격한 이상상태 유무를 실시간으로 감지하기 위한 센서의 출력은 변압기내 환경의 변화에 왜곡되어 나타나지 않아야 하며 외부의 전자기적 잡음에 안정적이어야 한다. 변압기는 부하의 변동에 따라 변압기내에서 열이 발생하게 되고 이 열은 유전율에 변화를 주게 된다. 실제로 열에 의한 절연유의 유전율 변화는 열화에 의한 유전율 변화보다 크게 측정되기 때문에 반드시 보상을 해주어야 한다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 센서의 외부 상자가 밀폐된 기준용 센서와 변압기 오일이 센서 전극 내부로 순환할 수 있는 구조의 측정용 센서를 한 개의 변압기에 장착하여 온도변화에 따른 유전율 변화를 2개의 센서가 동일하게 감지하도록 하였다. 개발된 센서는 (+)전극면, (-)전극면, 가드전극의 3단자 전극구조를 갖는 3-전극형 구조로 양면PCB를 사용하여 그림 3 및 그림 4와 같이 제작하였다. 그림 3에서처럼 전극은 전기용량을 증가시키기 위하여 2층의 병렬구조가 되도록 하였으며, 또한 shield 전극 및 guard전극으로 +전극 및 -전극을 감싸게 함으로써 정전실드의 효과를 얻도록 하였으며, 센서의 외부상자와 함께 완벽한 2차 정전실드가 되도록 하였다.

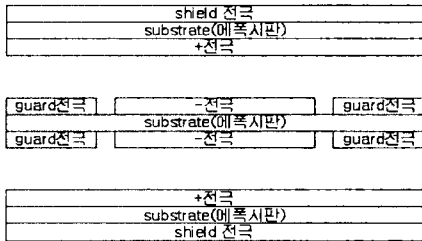


그림 3. 양면 PCB를 이용한 전극 설계

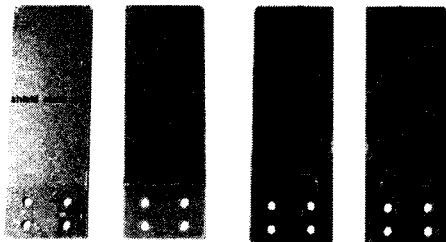


그림 4. 제작된 전극

제작된 센서는 그림 5와 같다. 양면 PCB로 제작된 +전극판 2개와 -전극 1개를 그림 5에서와 같이 2층 구조로 균일한 간격을 유지하도록 결합하였다. 결합된 전극은 센서 외부상자에 오일이 새지 않도록 O-ring을 사용하여 결합하였다. 한편 센서가 변압기에 체결 시에도 누유를 막기 위하여 같은 종류의 O-ring을 사용하도록 하였다.

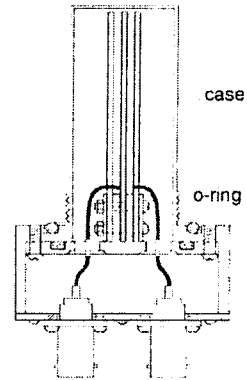


그림 5. 제작된 센서 구조

2.2 3-전극형 전기용량기 센서를 이용한 측정

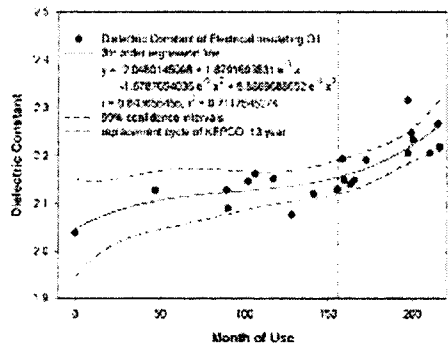


그림 6. 절연유의 사용기간과 유전율의 변화관계

그림 6은 변압기에서 사용된 절연유를 사용기간 대비 유전율 값으로 그린 것이다. 그림에서 13년에 그어진 점선라인은 현재 변압기의 정비주기이다. 그림에서 유전율 값이 완만하게 변화하다가 어느 시점부터 급속히 변화하고자하는 변곡점이 있고 그 시점부근을 변압기의 정비시점으로 하고 있음을 알 수가 있다. 그러나 모든 변압기는 제작상의 차이점과 운전부하의 차이로 인하여 상기 그림의 곡선을 따라간다고 기대할 수는 없다. 따라서 개발된 센서로 변압기의 유전율 변화를 감지함으로써 변압기의 교체시점과 운전 중 변압기 이상 유무를 감지해 낼 수가 있다.

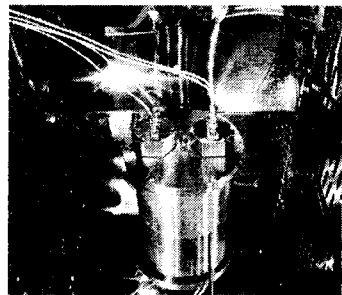


그림 7. 센서의 특성 측정을 위한 실험용 chamber와 온도 enclosure

제작된 센서의 온도에 대한 특성실험은 그림 7에서 보인 것처럼 황동으로 제작한 원통의 chamber에 기준용 센서와 측정용 센서를 장착하였다. 한편 기준용 센서에는 사용하지 않은 절연유를 담았고 chamber에는 100 개

월을 사용한 절연유와 200개월을 사용한 절연유를 측정용 센서의 전극이 충분히 함침 될 정도로 담았다. 온도를 30 ℃~130 ℃범위로 가변시키면서 전기용량을 측정 한 결과를 그림 8에 보였다. 그림에서처럼 온도의 증가에 따라 오일의 유전율은 값이 감소하는 것으로 측정이 되었으며 아주 우수한 선형성을 보여 주고 있다.

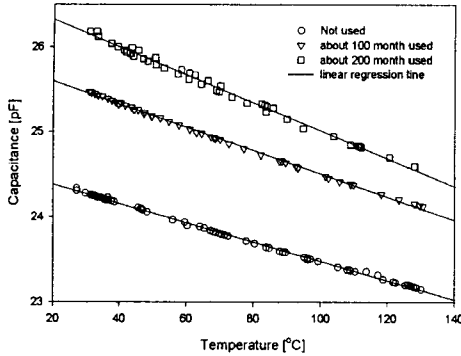


그림 8. 온도변화에 따른 신유 및 사용유의 전기용량변화

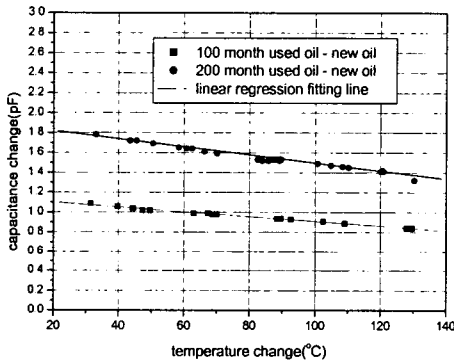


그림 9. 절연유의 사용기간과 온도의 변화에 따른 온도보상 불확도

한편 온도가변실험에서 절연유 사용기간이 길고 짧음에 따라 유전율의 변화량이 서로 다른 것으로 측정이 되었다. 이것은 기준 센서와 측정센서를 같은 온도에서 유지 하더라도 저온에서의 고온에서의 유전율 차이가 발생된다는 것이고 이것은 온도보상의 범위를 벗어나는 즉 온도보상의 불확도가 되는 것이다. 보통 변압기에서 온도가 25 ℃~80 ℃정도 변한다고 했을 때 절연유의 온도보상 불확도는 약 ± 5 % 정도로 계산이 되었으며 이것은 다른 방법으로 보상을 하는 것보다 우수한 것이다. 또 온도변화에 따른 불확도의 크기가 선형적으로 변하기 때문에 불확도도 충분히 보상해 줄 수가 있다. 국가표준기관인 한국표준과학연구원에서[2][3] 정밀측정된 절연유의 유전율과 센서로 측정된 유전율의 비교를 그림 10에 보였다. 그림에서와 같이 사용한 시간에 따른 유전율의 변화의 추세가 잘 일치하고 있음을 알 수가 있다. 따라서 제작된 센서가 절연유의 유전율을 잘 측정하고 있음이 증명된다. 그림 11에는 측정된 유전율의 변화와 절연유의 체적저항의 변화추세를 그렸다. 유전율 변화의 값과 체적저항 변화 값은 정확히 일치하지는 않지만 그 변화추세는 일치함을 알 수가 있다.

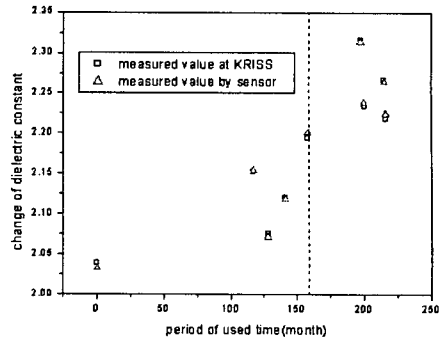


그림 10. 국가표준기관에서 측정된 유전율과 센서로 측정된 유전율 추세의 비교

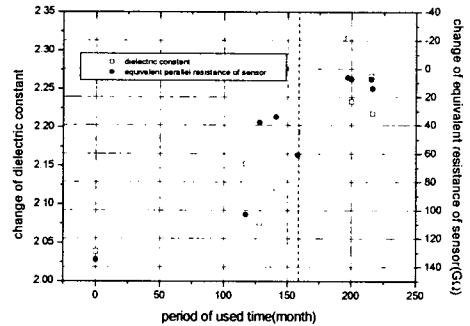


그림 11. 센서로 측정된 유전율과 등가병렬저항과의 추세비교

3. 결 론

변압기에 사용되는 절연유의 열화정도를 변압기의 운전정지 없이 실시간으로 측정할 수 있는 전기용량을 이용한 센서를 개발하였다. 개발된 전기용량형 센서는 3-전극형의 구조와 변압기에 센서의 외부상자가 접지될 때 2중의 정전차폐가 되도록 하여 외부로부터의 잡음에 영향을 받지 않도록 하였다. 또한 변압기에서 절연유의 온도변화에 따른 유전율 변화를 보상하기 위하여 기준용 센서와 측정용 센서를 한 개의 변압기에 장착함으로써 온도보상이 되도록 하였다. 제작된 센서는 변압기에서 절연유의 사용기간에 따른 유전율의 변화를 정확히 측정하였으며, 절연유의 체적저항의 변화도 감지 할 수가 있다. 따라서 개발된 센서에서 출력되는 신호를 phase sensitive detector를 사용하여 유전율의 변화로 혹은 체적저항의 변화로도 나타내 보일 수가 있으며, 외부에서의 측정전자회로의 이용에 따라서는 유, 무선을 이용하여 변압기의 이상 유무를 사무실에서도 알 수가 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] A.H.Scott and W.P.Harris, "Residual Losses in a Guard ring Micrometer-Electrode Holder for Solid-Disk Dielectric Specimens", J.Res.NBS, 65(2), 101-112, 1961
- [2] R. D. Lee, H. J. Kim and Yu. P. Semenov, "Precise Measurement of the Dielectric Constants of Liquids Using the Principle of Cross Capacitance", IEEE Trans, In.&Mea., Vol.50, No. 2, 298-301, 2001(4)