

전기용량 센서를 이용한 가속 열 열화 변압기의 온라인 상태진단

김주한*, 한상옥, 이세현, 김한준
 충남대학교, 대전기능대학, 한국표준과학연구원

On-line Condition Monitoring of Thermal Accelerating Aged Transformer by Capacitive Sensor

Ju-Han Kim*, Sang-Ok Han, Sei-Hyun Lee, Han-Jun Kim
 Chungnam National University, Deajeon Polytechnic College, KRIS

Abstract - In a transformer, thermal stress is the most influential parameter affecting the aging behavior of insulation system. The aging behavior of insulation system in transformer is determined mainly by the thermal conditions inside the transformer. The thermal stress on the insulation system may occur from operation in a high temperature caused by overloading or local overheating. Thus, this paper investigated the condition monitoring of insulation condition in thermally accelerated aged transformer oils by in-situ sensor. The condition of aged samples was investigated by measurements of relative permittivity i.e. capacitance change by capacitive sensor. Results from the experiments are presented in this paper.

면 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.

따라서 본 논문에서는 기존 시험방법들의 단점을 극복하고 공급전력의 신뢰성과 안정도 향상을 위해 전력설비의 예방진단기법을 도입하고자 하였다. 또한 선행연구를 통해 제작된 변압기 절연유의 열화진단용 전기용량형 센서를 부하시험기를 통해 전원을 인가한 배전용 변압기에 설치하여 실시간 측정을 통해 실시간 진단특성평가를 수행하였다.

1. 서 론

산업발달과 경제성장에 따른 전력수요는 지속적으로 증가하고 있으며, 이로 인해 전력계통을 이루고 있는 각종 전력설비들은 초고압화, 대용량화되고 있는 추세이다. 하지만 전력계통이 확장되면서 대용량화된 변압기가 부담하는 공급지역이 넓어짐에 따라 변압기의 고장사고 발생 시 정전구역이 광범위해지며, 이로 인한 경제적 손실과 파급효과 역시 그 규모가 커질 수밖에 없다. 따라서 전력계통을 구성하고 있는 각종 전력기들의 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 변압기 고장사고로부터 기인한다. 변압기 사고는 대부분 절연재료의 열화가 진전됨에 따라 성능이 저하하여 결국 절연파괴가 일어나면서 발생하므로, 열화된 변압기를 적기에 교체하거나 보수하기 위해 변압기의 절연열화를 조기에 진단할 수 있는 예방진단시스템을 구축하는 것이 현실적으로 매우 중요하다.

현재 국내 변전설비에서는 주로 유입식 변압기를 사용하고 있다. 유입식 기기의 주 절연재인 전기 절연유는 변압기의 전기적 절연과 냉각 작용에 중요한 역할을 담당하고 있으며, 오래전부터 각종 전기기기의 중요한 절연재료로서 널리 활용되어왔다. 그러나 고체나 기체 절연재료에 비해 그 전기전도나 절연파괴기구가 복잡하여 현재로서도 이에 대한 지속적인 연구의 필요성이 대두되고 있다. 변압기 운전 중 절연유는 부하율을 비롯한 사용환경에 따라 온도, 수분, 산화 및 유중에 잔유하는 용존가스와 기타 불순물들에 의하여 열화되며, 절연 및 냉각기능이 현저하게 저하하여 절연파괴와 같은 사고가 발생하게 된다. 또한 절연유의 열화는 절연파괴전압, 산화, 체적저항, 산화안정도, 점도, 인화점, 비색도, 유전정점, 유증가스 등에 영향을 미치므로 이러한 특성들을 측정하

2. 실 험

2.1 전기용량 센서의 구조

유전체가 채워진 두 전극간의 전압을 인가하였을 때 전기용량은 전극의 기하학적 체적 즉, 전극의 면적, 형상과 배치상태, 그리고 유전체의 비유전율(Relative Permittivity)에 의해 결정된다. 따라서 전극의 면적, 형상, 배치 등이 일정할 경우 전극간의 전기용량은 전적으로 유전체의 비유전율에 의해 결정된다. 위와 같은 특성을 이용하여 전기용량형 진단센서는 변압기 절연유의 비유전율, 즉 시료의 전기용량 변화를 측정함으로써 절연유의 열화정도를 판별하게 된다.

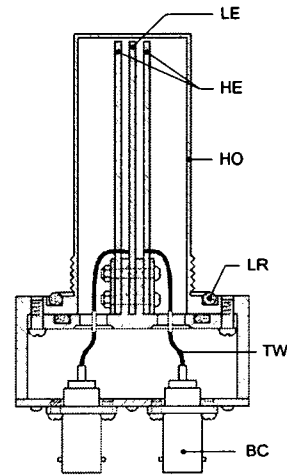


그림 1. 전기용량 센서의 단면도

그림 1은 3단자 전극을 응용하여 제작한 3전극형 전기용량 센서의 시작품을 보이고 있다. 변압기 내부에 취부할 경우를 고려하여 센서의 면적을 줄이면서 기존의 전기용량을 확보하기 위해 병렬구조로 하였으며, stray capacitance를 최소화하기 위해 Low 전극을 둘러싼 가드전극 이외에도 High 전극의 배면에 절드전극을 적용하여 이중 정전설드를 구성하여 변압기 내부의 전자계 영향이나 외부 노이즈를 최대한 배제함으로써 안정한 전기용량을 취득할 수 있도록 제작하였다.

2.2 실험장치의 구성

본 논문에서는 전기용량 센서의 실시간 열화진단 특성 평가를 위한 변압기 실증시험을 수행하기 위해 13년간 사용된 75kVA급 배전용 주상변압기를 사용하였으며, 변압기 내부권선의 최상부에 전기용량 및 온도센서를 설치하였다. 각 센서에서 취득한 데이터는 계측기를 통해 PC로 저장하였다.

또한 절연유의 비유전율 변화, 즉 센서의 전기용량을 측정하기 위해 LCR meter(42--, Agilent)를 사용하였으며, 측정 주파수는 10kHz로 수행하였다. 절연유의 비유전율은 온도에 의해 영향을 받으므로 전기용량 측정 시 시료의 온도를 측정할 필요가 있다. 특히 절연유의 비유전율 변화를 통한 실시간 진단 시, 부하율에 의해 상시적으로 변압기 유중 온도가 변하게 되므로 반드시 온도 보상을 필요로 하게 된다. 따라서 전기용량 센서 외부에 별도로 sheath 타입의 온도센서(RTD, PT100Q)를 설치하여 MUX(34--, Agilent)를 통해 시료의 온도를 측정하였다.

변압기는 고온운전 즉, 열적 스트레스에 의해 내부 절연물의 열화가 진행되므로, 온도상승시험법을 활용한 가속 열열화실험을 통해 전기용량 센서의 열화진단 특성을 평가하고자 하였다. 따라서 변압기 절연유의 온도를 상승시키기 위한 방법으로 기존의 온도상승시험법으로 널리 사용되고 있는 2차단락법을 활용하였다. 변압기 내부의 유중온도는 시험변압기의 정격용량을 고려하여 과부하시험기를 통해 약 120~140%의 부하율을 모의하도록 1차측에 고전압을 인가하는 방법을 통해 조절하였다. 시험변압기의 모의 부하율은 단락시킨 2차측 저압권선의 전류를 오실로스코프(LT37--LeCroy)를 통해 측정함으로써 간접적으로 환산하는 방법을 사용하였다.

그림 2는 전기용량 센서의 변압기 실증 시험을 위한 DAQ unit과 측정장비, 과부하시험기, 전기용량 및 온도 센서, 그리고 피측정물인 주상변압기의 구성도를 나타내고 있다.

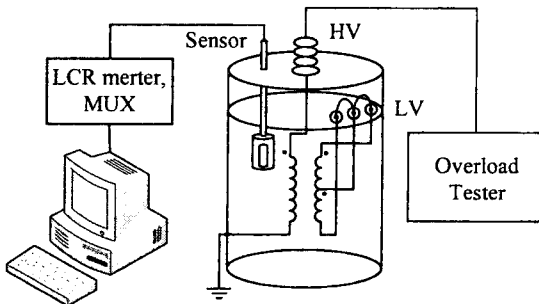


그림 2. 변압기 실증시험을 위한 장치구성

3. 결과 및 고찰

일반적으로 절연재료는 낮은 유전율(Dielectric constant, $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$)과 유전정접($\tan \delta$), 높은 절연저항 및 절연강도 등과 같은 양호한 전기적 특성이 요구되

고 있다. 특히 절연체에 교류전압을 인가하였을 때 발생하는 전력손실인 유전손실은 재료의 유전정접($\tan \delta$)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 진행되면 유전손실이 증가하는 것으로 알려져 있다.

따라서 지속적인 열 스트레스가 인가된 변압기에 전기용량형 센서를 설치하여 열 열화시간이 증가함에 따라 변압기 절연유의 비유전율 변화, 즉 전기용량의 변화를 분석 및 실시간 열화진단특성을 평가하고자 하였다. 또한 과부하시험기를 통해 시험변압기에 고전압을 인가하였을 때 내부권선에 발생하는 전자계에 대한 전기용량 센서의 차폐능력을 평가하였다.

그림 3~6은 전기용량 센서의 실시간 진단 특성 및 전자계 차폐성능 평가를 위한 변압기 실증시험에 대한 결과를 나타내고 있다. 실증시험 중에 절연유 샘플 채취를 위해 부득이 하게 실험을 구간별로 총 4회 수행하였다.

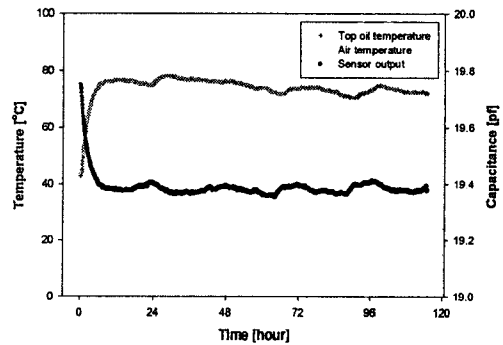


그림 3. 140% 부하에서의 실증시험

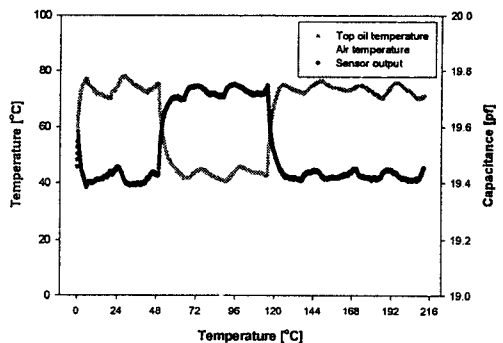


그림 4. 120~140% 부하에서의 실증시험

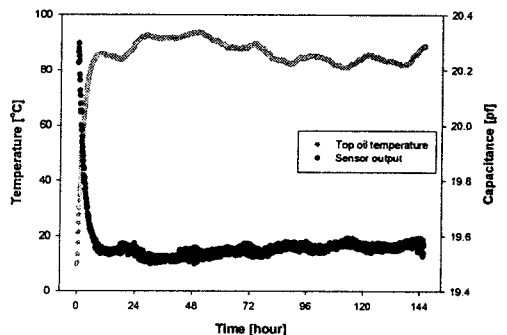


그림 5. 140% 부하에서의 실증시험

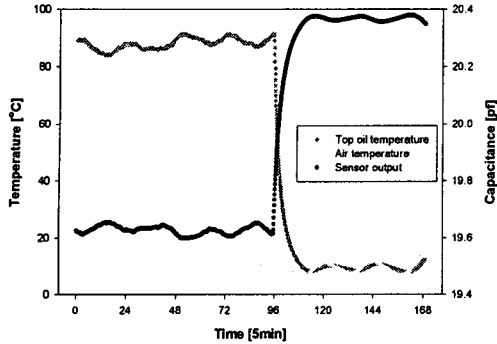


그림 6. 140% 부하에서의 실증시험

그림 3은 140%의 과부하 상태에서 전기용량 및 온도 센서의 실시간 진단특성에 대한 1차 실험결과를 나타내고 있다. 실험기간은 총 115시간 동안 수행하였다. 그림 4는 약 212시간 동안 120~140% 부하를 인가하였을 때의 2차 실험결과이다. 온도 및 전기용량이 큰폭으로 증감하는 부분은 절연유의 상태를 분석하기 위한 샘플채취를 위해 시험변압기를 정전시킨 구간이다. 그림 5는 약 146시간 동안 140% 부하를 인가하였을 때의 3차 실험결과이다. 그림 6은 약 169시간 동안 140% 부하를 인가한 4차 실험결과이다. 부하공급을 중단함과 동시에 유온이 급격히 감소하였으며, 전기용량은 증가함을 알 수 있다. 부하율이 일정함에도 불구하고 유중온도의 편차가 발생하는 것은 장시간 실험에 따른 대기온도에 의한 일교차로 인한 것으로 판단된다.

총 4회에 걸친 과부하 모의실증실험의 결과, 변압기의 경년열화에 따라 전기용량이 점차 증가하였으며, 절연유의 전기용량과 온도가 매우 뚜렷한 상관관계를 가지고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 과부하상태가 지속적으로 인가되었을 경우 유온이 점차적으로 상승함을 확인할 수 있었다. 이는 절연유가 받는 가혹한 열스트레스로 인해 비유전율과 유전점접 상승에 따른 유전손실의 증가 혹은 누설전류의 증가로 인한 것으로 판단된다.

또한 센서의 전자계 노이즈의 차폐성능을 확인하기 위해 동일한 조건에서 부하시험기의 전원만을 조절하여 측정데이터를 분석해본 결과, 표준편차가 0.08%로 atto Farad 수준에 머물러 있음을 확인할 수 있었는데, 이는 센서의 유효 측정범위를 수백 femto Farad 대역에 두고 있으므로 오차범위로 판단된다. 또한 계측기 자체의 랜덤 노이즈에 의한 영향 역시 무시할 수 없으므로, 전기용량 센서가 실제 운전 중인 변압기에 설치하였을 때 전자계 노이즈에 대한 차폐성능은 매우 우수한 수준이라고 판단하였다.

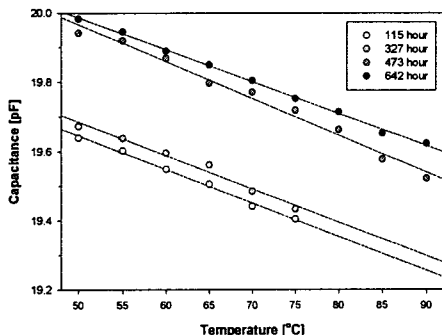


그림 7. 열 열화 시간에 따른 온도분포별 전기용량

그림 7은 그림 3~6의 측정결과를 열 열화시간이 증가함에 따라 온도분포별로 측정된 전기용량을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 시료의 온도에 대해 우수한 선형성을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 열화시간이 증가함에 따라 열스트레스로 인한 열화반응으로 인해 시료의 비유전율, 즉 전기용량이 증가함을 확인할 수 있으며, 특히 약 300시간 이후에 전기용량이 큰 폭으로 상승하는 것을 확인하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 선행연구를 통해 제작된 변압기 절연유 열화진단용 전기용량형 센서를 이용하여, 변압기 실증시험을 통해 센서의 실시간 열화진단 특성평가를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 전기용량형 센서는 시료의 온도에 대해 우수한 선형성을 보이고 있으며, 또한 온도와 뚜렷한 상관관계를 가지고 있음을 확인하였다.
- 전기용량형 센서는 실시간 진단센서로 활용할 경우, 우수한 온도이력특성으로 인해 온도보상에 유리할 것으로 판단된다.
- 전기용량형 센서를 가압된 변압기에 설치하여 전자계 노이즈에 의한 영향을 분석한 결과, 우수한 차폐성능을 보이고 있음을 확인하였다.
- 과부하시험기를 통해 변압기의 과부하 상태를 모의하여 열스트레스를 인가한 절연유의 경우 온도와 시간이 증가함에 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] 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
- [7] ASTM designation D924-82b, A-C loss characteristic and relative permittivity (dielectric constant) of electrical insulating liquids, 10.3, pp. 142-151
- [8] 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 대학전력연구 센터 육성 지원사업에 의해 작성되었습니다.