

변압기 층간 절연지의 열열화 특성 평가에 관한 연구

The Study on Characteristics for Thermal Aging of the Layer Insulation in Transformers

이병성*, 송일근*, 김동명*, 박동배**, 한상옥***

(Byung sung Lee*, Il keun Song*, Dong myung Kim*, Dong bae Park**, Sang ok Han***)

Abstract

The primary insulation system used in an oil-filled transformer is Kraft paper, wood, porcelain and, of course, oil. Modern transformers use paper that is chemically treated to improve its tensile strength properties and resistance to aging caused by immersion in oil. These insulation papers are mainly aged to thermal stress. Over the course of the insulation paper and oil's life it is exposed to high temperatures, oxygen and water. Its interaction with the steel of the tank and core plus the copper and aluminium of the windings will eventually cause the chemical properties of the oil to decay. High temperature have an effect on mechanical strength of cellulosus paper using the layer insulation. We made two aging cell in which thermal aging tests of insulation papers and mineral oil are conducted. It is measured dielectric strength, number of acid, moisture, etc. of insulation paper and oil aged in the aging cells.

Key Words : transformer, kraft paper, thermal aging, mineral oil

1. 서 론¹⁾

변압기는 전력계통에서 중요한 부분을 차지하고 있으므로 수 년 동안 운전함에 있어 충분한 신뢰성이 있어야 한다. 변압기의 신뢰성은 권선 절연시스템의 신뢰성으로 볼 수 있다. 일반적으로 배전용 변압기의 절연은 셀룰로오스지와 광유의 조합으로 구성되는데 이들 절연시스템의 수명은 운전조건, 산화, 수분 등에 의존한다. 이들의 영향을 최소화 하는 것이 절연열화를 줄이는 방법이 된다. 특히 수분은 변압기 내부에서 서서히 확산되며 권선내부에서 발생된다.

유입 배전용 변압기의 설계나 운전이 영향을 주는 많은 요소들 중에 셀룰로오스 절연지의 열적 내력이 가장 중요하다. 유입변압기는 운전 중의 온도 이력에 의해 권선절연지와 프레스보드 등의 절연재료의 열열화가 진행되고 전기적인 절연 특성이 저하된다. 보통 운전온도 영역에서는 수분의 영향을 포함한 절연지 열화특성이 불명확하기 때문에 실제 현장에서와 유사한 과부하 상태에 가까운 온도에서 장기간의 재료열화시험을 실시하여 특성을 규명할 필요가 있다.

절연지 및 절연유의 열화특성을 모의하기 위해 자체에서 제작한 열화셀 등을 이용하여 유입변압기에 사용되는 유침 절연지 및 절연유의 열적 열화 특성을 평가하였다.

열화후의 특성변화를 관찰하기 위해 열화전의 절연지 및 절연유에 대한 기초데이터를 측정하였다. 열화된 절연지와 절연유에 대해 절연내역 시험 시분함량시험, 전산가, 함유가스량 등을 분석하고

* 한전 전력연구원 전력계통연구실
(대전시 문지동 103-16)

Fax: 042-865-5804

E-mail : leebs@kepri.re.kr

** 한국전력공사 충북지사

*** 충남대학교 전기공학과
(대전시 유성구 궁동 220)

열화전과 비교 분석하였다 .

2. 실험

2.1 실험장치

변압기 절연지 및 절연유의 열화특성을 평가하기 위해 그림 1과 같은 열화 셀을 고안하여 시험하였다. 원통형 셀 내에 변압기에 사용되는 절연지, 동선, 철심, 절연유 등을 실제 변압기와 같은 비율로 넣고 밀봉한 후, 외부에서 중탕 가열하는 방법으로 열화시험을 하였다. 열화도중 내부압력의 과도한 상승을 방지하기 위해 상부에 일정압력 (1 kg/cm²) 이상이 되면 대기로 방출할 수 있는 장치를 설치하였다. 절연유 계면을 공기로 하였으며, 열화를 위한 셀 내부의 절연유 온도는 125 ℃로 하였다.

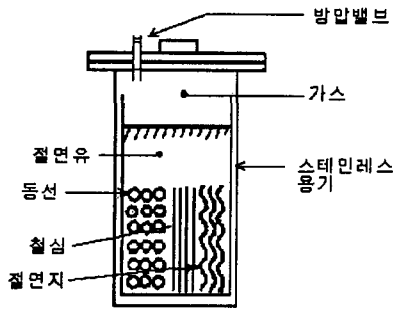


그림 1. 열화셀의 구성

Fig. 1. schematic for aging test cell

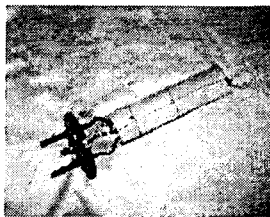


그림 2. 절연지 열화 시험장치

Fig. 2. schematic for aging test cell

또한 변압기 권선의 핫스팟(hot spot)에서 절연 열화 특성을 평가하기 위해 그림 2와 같이 이를 모의할 수 있는 장치를 구성하였다. 그림과 같이 도체 위에 절연지를 감은 다음 열화셀에 넣고 도체에 전류를 흐르게 하여 절연지를 열화시키는 방식으로 구성되었다.

입력 전류를 제어하는 방식으로 셀 내의 도체 온

도를 160℃로 하였으며, 이때 절연유의 온도가 130℃로 유지되었다. 열화시간은 각각 500시간, 1,000시간, 1,500시간으로 하였으며, 시험의 균일성을 확보하기 위해 동일조건 시료에 대해 3개의 셀을 이용하여 동시에 열화 시험을 하였다. 셀 내부에는 온도를 측정할 수 있는 센서가 2개 씩 부착되어 온도가 설정치로 자동 제어되게 되어 있다.

2.2 시료의 구성

열화시험에 사용된 시료는 배전급 변압기 1차 절연지로 많이 사용되고 있는 0.18 mm 셀룰로오스 절연지가 사용되었으며, 절연유는 광유를 사용하였다.

절연유의 분석은 ASTM D 2612-01, 절연과피 전압 측정은 KS C 2101-00, 인장강도 측정은 ASTM 828에서 추천하고 있는 방법을 따랐다.

3. 결과 및 고찰

3.1 절연지 열화 특성 분석

열화셀을 이용하여 125℃에서 1000시간 열화시킨 경우 절연지의 열화가 미미하였다. 인장강도, 절연내력 등은 신货到에 비해 85% 이상 이었다. 따라서 160℃에서 절연지를 열화시킨 시험 데이터에 대한 결과를 다음에 나타내었다.

그림 3은 130℃의 열화셀에서 1000시간 동안 열화된 절연지의 열화 전 후의 유전손실을 측정하는 것을 나타낸 것이다.

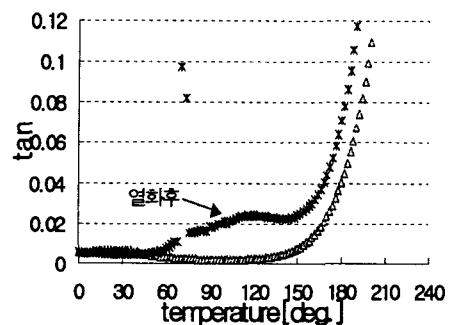


그림 3. 유전손실 측정

Fig. 3. A dielectric loss on aged insulation paper

열화 전 후의 절연지 인장시험 결과를 표 1에 나타내었다. 셀룰로오스 절연지의 경우 열화 시간

의 경과에 따라 인장강도가 상당히 감소함을 알 수 있다.

핫스팟 온도가 160℃에서 약 500시간 경과하게 되면 인장강도가 50%이하로 감소함을 알 수 있었다. 이때 절연지의 절연내력은 초기의 약 65%로 감소하였다. 열화된 절연지의 인장강도와 절연내력과의 상관성을 그림 3에 나타내었다.

표 1. 스퍼터링 조건.

Table 1. Sputtering condition.

| 열화조건 | 열화전 | 500hrs | 1000hrs | 1500hrs |
|-------------|-----|--------|---------|---------|
| 인장강도 (g/cm) | 947 | 536 | 304 | 313 |

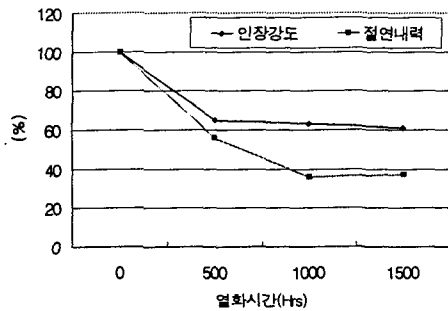


그림 4. 열화에 따른 절연지 인장강도와 절연내력
Fig. 4. Comparison of tensile strength to dielectric strength for aged insulation

3.2 절연유의 열화 특성 분석

표 2는 1500시간 열화된 절연유의 절연파괴전압, 수분함량, 전산가를 측정된 결과를 나타낸 것이다. 절연유의 절연파괴전압, 수분함량 및 전산가는 열화에 비해 큰 변화가 없었다. 분석에 나타난 수분함량은 시험전 절연지가 완전히 건조되지 않아 절연지 내부에 함유된 수분으로 판단된다.

표 2. 절연유 특성분석

Table 2. Analysis of aged mineral oil

| 구 분 | 시료1 | 시료2 | 시료3 |
|--------|------|------|------|
| 절연파괴전압 | 60 | 60 | 60 |
| 수분함량 | 26 | 21 | 20 |
| 전산가 | 0.01 | 0.02 | 0.01 |

표 3은 열화시간에 따라 열화셀 내에서 열화된 절연유의 유증가스분석 결과를 나타낸 것이다. 열화 전에 비해 유증가스량이 상당히 증가하였음을 알 수 있었다. 분석결과 물론 부분방전이나 아크 방전에 의해 나타나는 H₂, C₂H₂는 거의 검출되지 않았다. 크래프트지, 프레스 보드, 베이클라이트 등과 같은 절연재료가 100℃ 이상의 온도로 가열되었을 때에 다량으로 발생하는 이산화탄소(CO₂) 및 일산화탄소(CO)가 검출되었다.

표 3. 유증가스 분석

Table 3. Analysis of dissolved gas in mineral oil

| 구 분 | 열화전 | 160℃ 열화 (ppm) | | |
|-------------------------------|-----|---------------|---------|---------|
| | | 500hrs | 1000hrs | 1500hrs |
| H ₂ | 0 | 6 | 3 | 1 |
| C ₂ H ₄ | 0 | 18 | 23 | 8 |
| C ₂ H ₆ | 1 | 33 | 17 | 8 |
| CO | 2 | 160 | 184 | 102 |
| CO ₂ | 46 | 2054 | 2416 | 2408 |
| 가연성 가스 | 2 | 219 | 227 | 118 |

그림 5는 1500시간 열화된 절연유의 유전특성을 분석한 것이며, 그림 6은 절연유의 화학구조를 분석한 것으로 신유에 비해 큰 변화는 없었다. 측정 온도 80℃까지도 유전정점이 1% 이내로 나타나 양호한 특성을 보였다.

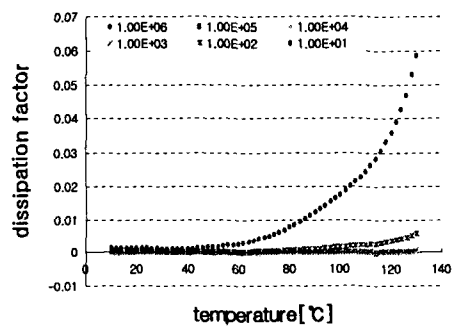


그림 5. 열화에 따른 절연유의 유전특성
Fig. 5. Dissipation factors of an aged mineral oil

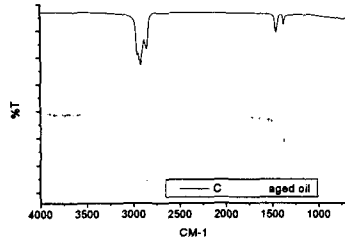


그림 6. 절연유 화학구조 분석

Fig. 6. Analysis of FTIR spectra on an aged mineral oil

이상의 결과로부터 열화시간의 길어질수록 가스 발생량은 약간씩 증가하는 경향을 보였지만 수분함량, 전산가, 절연내력 등은 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 따라서 1500시간 동안 열화셀에서 열화시킨 절연유는 절연지의 열화에 의해 어느 정도 영향을 받고 있지만, 전기적인 특성에는 큰 변화가 없었던 것으로 나타났다.

4. 결론

절연지의 열화특성을 평가하기 위해 2가지 종류의 열화셀을 이용하여 최대 1500시간까지 열화 시험하였다.

- 1) 절연유의 절연파괴전압, 전산가 및 수분함량은 열화시간에 관계없이 거의 변화가 없었다.
- 2) 변압기 권선의 핫스팟 온도가 160℃에서 500시간 정도 운전하였을 경우 셀룰로오스 층간 절연지가 급격히 열화되어 절연내력 및 인장강도가 감소됨을 알 수 있었다.
- 3) 변압기 권선의 핫스팟 온도 관리가 중요하며, 수명연장을 위해서 이 부분에 고온 절연지의 적용을 고려할 필요가 있다.
- 4) 가스분석결과
 - 일산화탄소(CO) 및 이산화탄소(CO₂)의 양은 열화시간의 경과에 따라 약간 증가하는 특성을 보였다. 이는 절연지의 열열화를 의미한다.
 - 열화에 따른 절연유의 절연파괴전압, 전산가 및 수분함량, 용존가스량의 변화는 크지 않은 것으로 보아 125℃의 온도에서 절연유 및 절연지는 특성변화가 크지 않았다.

참고 문헌

- [1] 한국전력공사, “주상변압기 단락특성 개선에 관한 연구”, 한전전력연구원, 2002년.
- [2] Masayuki Sakai, Naoki Kobayashi, Nobuyuki Daikuhara, “Research on Insulation Paper Thermal Deterioration in Oil-Immersed Transformer Over-Load Operation”, Tokio Electric Power Company, TIEE Japan, B, Vol.121-B, No.4, pp.507-513, 2001.
- [3] R. Blue, D. Uttamchandani, O. Farish. “Infrared Detection of Transformer Insulation Degradation Due to Accelerated Thermal Aging” IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation Vol.5 No.2, 1998. 4