

가속열화 방법에 의한 주상변압기 절연물의 열열화 특성 평가

이병성, 송일근, 이재봉, 박동배*, 한상옥*
한전전력연구원, 한전 진천지점*, 충남대학교**

The Evaluation of Thermal Aging Characteristics in Insulating Paper for the Use of the Pole Transformers

Byung-Sung Lee, Il-Keun Song, Jae-Bong Lee, Dong-Bae Park, Sang-Ok Han*
KEPRI KEPCO, Chungnam Nat'l Univ.**

Abstract

The primary insulation system used in an oil-filled transformer is kraft paper, wood, porcelain and oil. Modern transformers use paper that is chemically treated to improve its tensile strength properties and resistance to aging caused by immersion in oil. But 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 cellulos 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 : Pole transformer, Thermal Aging test, Cellulose paper, Mechanical strength

1. 서 론

배전용 변압기의 운전경험이나 수명특성 시험에 의하면 변압기가 제조결함이 없고 과부하에 의한 열적열화나 외적인 스트레스가 작용하지 않은 상태에서 운전된다면 수명이 30년 이상 될 것이라는 것이 지배적인 의견이다.

배전용 변압기가 받는 주요한 열화 메카니즘은 과부하 고온 운전에 따른 열적 열화현상, 외부 단락전류 유입에 의한 단시간의 열적 열화현상, 진동에 의한 기계적 손상현상, 부분방전 열화현상이라고 할 수 있다. 이러한 열화현상으로 인해 절연물의 전기적·기계적 성능이 점차 저하되어 현장에서 변압기 고장이 발생되게 된다.

변압기 층간 절연물로 사용되고 있는 셀룰로오스(cellulose) 절연지는 좋은 유전상수값을 갖고 취급하기가 적당하기 때문에 대부분의 변압기에서 많이 사용되고 있다. 최근에는 열적열화에 대한 저항성

이 상당히 개선된 제품이 많이 소개되고 있다. 셀룰로오스 절연지는 짧은 시간이라도 고온에 노출되었을 경우 절연수명에 영향을 받지만 즉각적인 결과로 나타나지는 않는다. 셀룰로오스지에 가혹한 열적스트레스가 가해졌더라도 절연유내에 함침되어 있고 손상을 받지 않은 완전한 상태라면 아주 좋은 유전성질을 갖는다. 특별한 외적요인이 없으면, 변압기는 이론적 절연수명이 완료된 후에도 계속해서 기능을 잘 발휘할 것이다. 그러나 열적열화로 인해 기계적 내력을 잃게 되면 셀룰로오스 절연지는 고장이 발생되기 쉽다. 예를 들면, 변압기의 진동이나 고장전류가 흐르는 동안 발생된 기계력은 열화된 절연지의 물리적인 손상을 야기하여 전기적 절연파괴를 가져올 수 있다.

본 연구에서는 기존 주상변압기의 절연 열화 특성을 개선하기 위해 변압기 절연시스템에 적용되고 있는 절연유 및 절연지에 대한 열적인 열화 특성을 평가하였다.

변압기 운전시 부하에 의한 권선의 핫스팟(hottest-spot) 부분의 온도가 절연지 및 절연유를 열화시켜 변압기 수명에 절대적인 영향을 미친다. 따라서 과부하로 인해 핫스팟 온도가 급격히 상승할 때 변압기 절연유 및 절연지의 열 열화특성을 이해하는 것이 중요하다. 절연유 및 절연지의 열 열화를 평가하기 위해 열화장치를 고안하여 시험하였다.

2. 절연물 열화평가 방법

2.1 가속열화 시험 방법

가속열화 시험을 위해 그림 1과 같은 열화 셀을 고안하여 시험하였다. 스테인레스 재질의 원통형 열화셀 내에 최근 주상변압기에 많이 사용되고 있는 셀룰로오스 절연지, 동선(PEW), 철심(규소강판), 절연유(광유 1종2호) 등을 50 kVA급 주상변압기와 유사한 비율로 넣어 밀봉한 후, 가열하는 방법으로 열화 시켰다. 절연유 계면을 공기로 하였으며 셀의 상부에는 일정압력 이상에서 자동으로 동작하는 밸브를 설치하였다. 절연유의 내열온도를 고려하여 열화 온도는 130℃로 하였다. ANSI/IEEE C57.91에 의하면 권선온도상승이 55℃인 변압기의 권선최고 온도(hottest-spot temperature)에 따른 수명 손실율은 130℃에서 3000시간 열화시킬 경우 대략 절반 정도가 되는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 방법으로 열화시킨 절연유는 KS C 2101에 따라 절연 내력을 측정하였으며, WinDETA system으로 유전율 및 유전정점을 측정하였다.

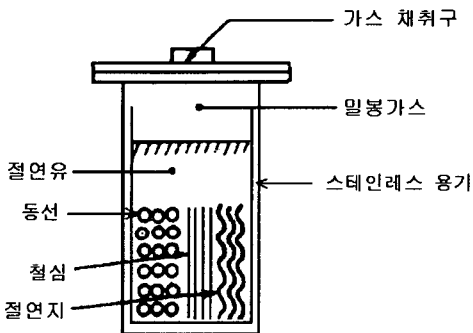


그림 1. 가속열화 시험용 셀의 구성.

2.2 핫스팟에 의한 열화 모의시험

권선의 핫스팟 부분에서의 절연지의 열화 상태를 모의 시험하기 위해 그림 2과 같은 시험 장치를 구성하였다. 열원으로 표면 온도가 일정한 타원 형태의 가열 히터를 사용하였으며, 변압기 열화환경과 유사한 시스템으로 구성하기 위해 에너멜 코팅된 1차 동선(AIW, 2.0 mm)으로 히터 표면을 균일하게 감았다. 그 위에 절연지를 4층으로 감고 다시 에너멜 동선을 감아 고정 하였다. 이와 같은 방법으로 절연지를 고정시킨 후, 절연유가 채워진 기밀 용기 내에 넣고 히터 온도를 90℃로 하여 충분한 시간동안 안정화시켰다. 온도를 측정하고 제어하기 위해 히터 표면과 절연유 상부 및 하부에 온도센서를 설치하였다. 절연지에 가해지는 열적 스트레스는 히터 표면에 설치한 온도센서를 이용하여 조절하였다.

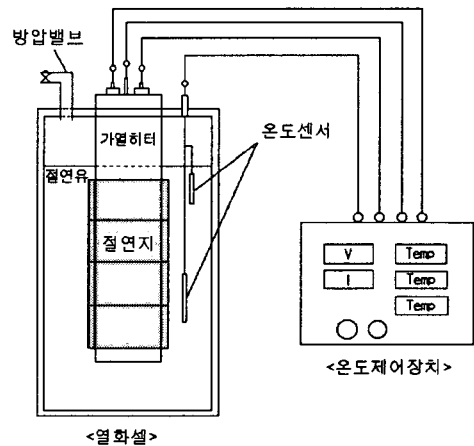


그림 2. 권선의 핫스팟에서의 열화상태 모의 시험 장치 구성.

시험에 적용된 모의 최고 온도(hottest-spot temperature)는 160℃로 하였으며, 이 경우 ANSI/IEEE C57.91의 수명기대곡선에 따르면 수명 기대치가 500시간 정도가 된다. 이때 시험장치의 절연유 상부 온도는 132℃이었으며, 절연유 상부와 하부의 온도차는 약 20℃ 정도가 되었다. 열화 방법은 9시간은 히터에 전원을 공급하여 160℃로 유지하고, 다음 15시간은 히터 전원을 차단하여 상온으로 유지하는 것을 1주기로 하였다. 히터가 동작한 총 시간은 250시간 이었다.

열화에 사용된 절연지는 셀룰로오스지(A종)종류의 것을 사용하였다. 제조업체별로 약간의 차이는 있지만 저손실형 주상변압기 1차권선 층간 절연재료로 두께 0.18 mm 셀룰로오스 절연지가 주로 사용되고 있으므로 모두 동일한 두께의 절연지를 선택하였다. 절연지의 크기는 인장강도 시험을 위해 나비 20 mm, 길이 250 mm로 하였으며, 가속열화 후 절연내력, 유전특성, 인장강도 등을 측정하여 열화 전과 특성을 비교 평가하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 절연유의 절연내력

열화된 절연유는 열분해에 의해 검게 탄화 되었다. 그림 1의 방법에 의해 열화시킨 절연유의 절연내력 측정은 KS C 2101에 의해 하였다. 절연유 신품의 절연파괴전압은 평균 63[kV] 정도였으나, 열화가 진행됨에 따라 절연내력이 점차 감소하였다. 3000시간 열화 후의 절연내력은 열화전의 절반 정도로 감소하였다. 그림 3은 열화에 따른 절연유의 절연내력을 비교하여 나타낸 것이다. 참고로 13년간 현장에서 사용한 주상변압기 3대에서 절연유를 발취하여 측정한 결과를 동시에 나타내었다. 열화에 따른 절연유의 탄화현상 및 이물의 증가로 절연내력 감소와 함께 절연내력 값의 편차도 컸다.

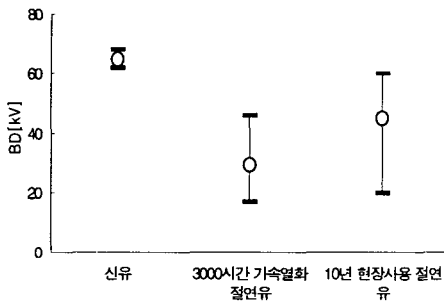
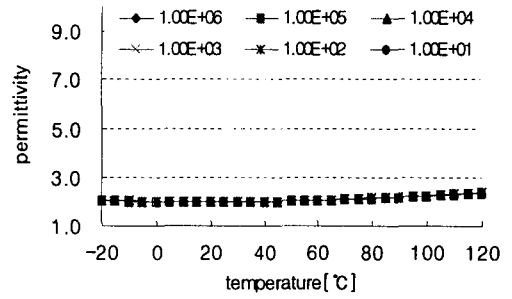


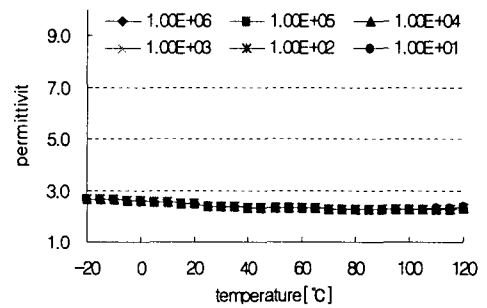
그림 3. 열화에 따른 절연유의 절연내력 변화.

3.2 열화 절연유의 유전특성

열화 전, 후 절연유의 온도 및 주파수에 따른 유전율, $\tan\delta$ 의 측정 결과를 그림 4에 나타내었다. 열화에 따른 유전율의 변화는 아주 작았으나, 열화된 절연유의 유전손실은 증가함을 알 수 있었다. 또한 온도 및 주파수의 영향은 크게 받지 않는 것으로 나타났다.



(a) 열화전



(b) 3000시간 열화 후

그림 4. 가속열화 전, 후의 유전을 변화.

3.3 열화절연지 절연내력

구전극 사이에 절연지를 삽입하여 상용주파 교류 절연파괴전압을 측정한 결과 열화전에 비해 절연내력이 약간 감소하는 경향을 보였다. 즉, 셀룰로오스 절연지가 열에 의해 어느 정도 열화 되더라도 절연내력이 유지됨을 알 수 있다.

3.4 열화절연지의 유전특성 변화

그림 5는 열화된 셀룰로오스의 온도 및 주파수에 따른 유전율 변화를 측정한 것이다. 열화된 A종 셀룰로오스 절연지의 경우 일정온도 이상부터 온도증가에 따라 유전율이 급격히 증가함을 알 수 있다. 참고로 H종 아라미드 절연지의 경우 내열 특성이 우수하여 동일한 조건에서 거의 열화되지 않아 온도증가에 따라 유전율 변화가 적은 것을 알 수 있었다.

순간적인 과부하의 영향으로 변압기 권선 부분의 온도가 높게 되면, 유전율 차이에 의해 이종 절연물간의 전계 분포 불균형으로 특정 절연물에 전기적 스트레스가 가중되어 절연파괴가 발생할 수 있다.

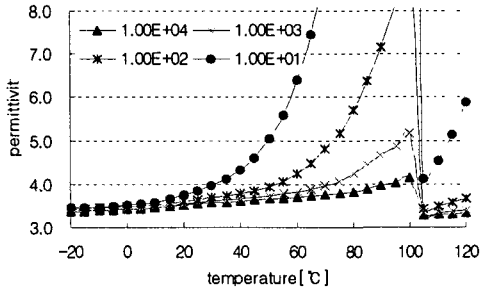


그림 5. 열화 후 절연지의 유전율 변화.

3.4 열화절연지의 인장강도 변화

절연지의 인장강도 측정은 KS C 2313 '전기절연지 시험방법'에 의하여 하였다. 나비 15 mm, 길이 250 mm의 절연지 시험편을 절연지의 세로 방향 또는 가로 방향으로 5매 채취하여 KS M 7014에 규정하는 인장시험기를 사용하여 시험하였다.

그림 5는 열화에 따른 절연지의 인장강도를 나타낸 것이다. 비교를 위해 아라미드계 절연지의 시험 결과도 함께 나타내었다. 셀룰로오스 절연지는 열에 의해 열화되어 인장강도 저하가 심한 것으로 나타났다.

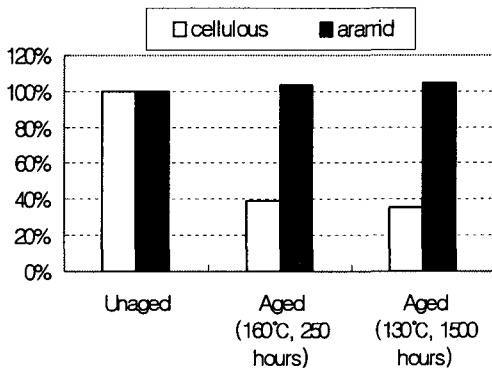


그림 6. 열화에 따른 절연지 인장강도 비교.

4. 결론

셀룰로오스 절연지가 열화 되었을 때 절연파괴전압은 신제품에 비해 약간 저하된 정도였으나, 온도 증가에 따른 유전율의 변화가 컸다. 과부하 또는 변압기 진동과 같은 외부적인 요인이 없다면 전기적인 성능에는 큰 문제가 없을 것으로 판단된다. 그러나 열화 시간에 따른 기계적 강도가 신제품에 비

해 급격히 저하되므로 외부적인 진동이나 단락 기계력 등이 작용할 경우 절연지가 손상을 받아 성능에 문제가 발생될 여지가 있다.

또한 전기 절연유는 열화에 따른 절연내력의 저하는 있었지만 30 kV 이상을 유지하였다.

참고 문헌

- [1] "주상변압기 단락특성 개선에 관한 연구", 최종보고서, 한전전력연구원, 2002
- [2] I.K. Song, J.W. Jung, S.B.S. Lee, H.R. Kwak, "Characteristic Assessment of Insulating Paper with Varnish Treatment", *ICEE*, pp.1231~1235, '02.7.10
- [3] J.W. Wook, I.K. Song, K.S. Koo, H.S. Song, H.R. Kwak, Y.H. Han, "Physical and Electrical Characteristics of Varnish and Varnish Treated Insulating Paper for Pole Transformers", *Journal of KIEE International Transactions on PE*, Vol. 2-A, No. 3, pp.114-120, '02.12
- [4] J.W. Wook, B.S. Lee, I.K. Song, H.R. Kwak, "A Guide for Analying Fault Causes of Pole Transformers", *Journal of KIEE International Transactions on PE*, Vol. 2-A, No. 3, pp.114-120, '02.9