

배전용 변압기 절연물의 열화특성에 관한 연구

이원규*, 조시형**, 최명호**, 신동휘***
 한밭대학교*, 한전 중앙교육원**, 한전 본사***

A Study on Thermal Deterioration Characteristics of Insulator in Oil Filled Distribution Transformers

Won-Kyu Lee*, Si-Hyung Cho**, Myeong-Ho Choi**, Dong-Hwi Shin***,
 Hanbat National University*, KEPCO Central Education Institute**, KEPCO H/O***

Abstract - 본 연구에서는 열적 스트레스에서 중간 절연지가 받는 열화현상을 규명하고 절연지의 열화가 절연유 열화에 미치는 영향에 대해서 고찰하였다. 변압기 절연물의 열화는 온도와 시간에 좌우되므로 이를 모의화 할 수 있는 시험장치를 제작하고 보다 정확한 모의시험이 가능하도록 절연유 열화와 절연지 열화시험을 구분하여 실험하였다. 실험결과 절연유가 열적 스트레스를 받는 경우 열화시간에 따라 절연내력이 감소되었고 유전손실은 증가되었다. 유전손실은 열화시간과 온도상승에 크게 좌우되었다. 절연지가 절연유 내에서 열적 스트레스를 받을 경우에는 열화시간에 따라 인장강도는 급격히 감소되었고 유전손실과 유전율은 증가됨을 알 수 있었다. 또한 유전율의 변화는 절연유와의 절연지의 계면에서 전압 스트레스와 불균일하게 되어 수명단축의 원인이 될 수 있음을 보여주었다.

63%, 저압권선에서 9%, 고압과 저압권선 사이에서 16%의 고장이 발생하였다. 반면에 철심, 탭 절환 스위치, 리드선 이탈 등과 같은 권선 외적인 고장은 12%에 불과하였다. 국내 배전용 변압기 고장원인 분석에 따르면 제조 불량 요인이 상당히 많은 부분을 차지하고 있다. 최근에는 변압기 제조공정의 표준화 및 품질관리의 노력으로 제조결함에 의한 고장요인이 점차 감소되고 있으며, 제조결함은 제조자의 노력에 의해 충분히 개선될 수 있다. 하지만 변압기 운전 중 과부하 등에 의해 발생된 열적 스트레스는 권선 중간절연에 상당한 악영향을 미치게 된다. 변압기 수명에도 직접적인 영향을 주는 인자이므로 중간 고체 절연물의 열적스트레스에 의한 열화 패턴을 파악하는 것이 중요하다.

따라서 본 연구에서는 변압기의 열화에 대해 고찰하고 열적 스트레스에서 중간 절연지가 받는 열화현상을 규명하고자 열화 모의시험 장치를 이용하여 열화시험을 하였으며, 절연지 열화가 절연유 열화에 미치는 영향 등에 대해서 평가하였다.

1. 서 론

변압기를 정격부하 이상으로 운전할 경우 내부 온도가 상승하여 변압기 성능에 많은 영향을 끼친다. 과부하 운전의 경우 권선절연지, 프레스보드 등의 고체절연재료의 열열화 촉진으로 인해서 기계적 강도가 감소되어 권선부분의 단락세기가 떨어진다. 또한 고체절연재료의 함유부분이 고온상태에서 노출되면 동일 재료 중의 수분이 과포화 되어 도체 근처에서 수증기와 같은 기포를 발생하고 절연성능을 감소시키게 된다. 변압기에서 발생하는 열화에는 과부하 고온 운전에 따른 열적 열화, 외부 단락전류 유입에 의한 열적열화, 진동에 의한 기계적 손상, 그리고 부분방전 열화현상이 있다. 이러한 열화현상으로 변압기의 전기적·기계적 성능이 저하하게 되면 변압기의 기계적 강도가 저하되고 진동이 증가하며 가연성 가스가 발생하여 결국 사고로 진전하게 된다.

전기사용 고객들에 전력을 공급하기 위한 배전용 변압기는 넓은 지역에 많은 수가 설치되어 있다. 최근의 전력수요의 큰 증가와 함께 각 국가의 전기위원회의 주요한 관심사 중 하나가 배전용 변압기의 높은 고장률이다. 주요한 고장원인은 자기회로에서의 고장, 권선에서의 고장, 그리고 절연약화로 인한 고장으로 나타나는데 먼저 자기회로에서의 고장은 상대적으로 적지만 배제할 수 없는 실정이다. 철심부분에 절연이 나빠져 국부적인 와전류를 집중시켜 적층한 구조상공간에 단락이 발생하는 경우, 클램핑 볼트와 철심을 고정하는 볼트가 잘 잠겨있지 않으면 전자기계력에 의해 철심의 절연을 약하게 하고 진동손상을 야기할 경우가 있다. 그리고 권선과 절연부분에서의 고장은 배전용 변압기에서 가장 흔히 발생하는 경우로 이것은 제조결함, 부적절한 보호방식, 유지보수 문제, 그리고 지속적인 과부하가 원인이 된다. Haryana State Electricity Board 소속의 한 변압기 수리업체에서 조사한 결과에 따르면 수리변압기의 88%가 고압 또는 저압권선의 손상 때문인 것으로 나타났다. 고압권선에서

2. 본 론

2.1 변압기의 열화

변압기에 사용되는 절연의 구성요소로는 크게 절연재와 절연유로 나눌 수 있고, 절연유에는 광유계 절연유와 합성 절연유를 포함한 여러 종류가 있지만 현재 주상변압기에 사용하는 절연유는 광유 1종 2호에 적합한 것으로 규정되어 있다. 일반적인 주상변압기의 열화 진전 메커니즘은 그림 2.1과 같이 열, 전계, 수분, 산소 등이 원인이 되어 절연재나 절연유를 열화시켜 절연지의 탄화와 절연유의 분해가스를 생성시키는 형태로 진행된다.

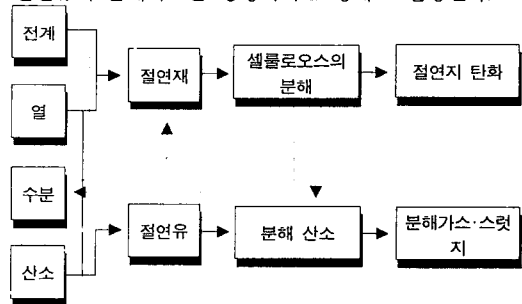


그림 2.1 주상변압기의 열화진전 메커니즘

일반적으로 재료는 가열상태에서 구성 분자간의 결합이 끊어지는 현상이 진행되는데, 이러한 결합의 절단이 열적열화의 주요 요인이 되고 있다. 이러한 절단현상은 열분해, 열해리, 열해중합 등으로 나타나는 것으로 알려져 있다. 유중에 국부과열이 존재하면 열분해에 의한 가

스가 발생하는데, 유증의 가연성 가스의 발생속도는 온도상승에 따라 기하급수적으로 증가한다.

2.2 절연지의 열화

변압기 고장의 가장 흔한 것은 권선 절연지의 열 열화이다. 절연지는 목재나 기타 식물원에서 추출한 셀룰로오스 섬유이다. 셀룰로오스는 가지가 없는 베타(1-4)글리코시드 결합(glycosidic bond)으로 연결된 D-anhydro-glycopyranose units로 구성된 선형 폴리머이다. 단일 셀룰로오스 섬유는 수소결합에 의해 결합된 것들의 수많은 결합으로 형성된다. 건조되었을 때 섬유들간의 부착은 이 섬유의 독특한 성질이다. 그러나 셀룰로오스는 고온에서 사용되거나 기름이 들어갔을 때는 셀룰로오스 사슬은 깨진다. 셀룰로오스 분자의 열 열화의 메카니즘은 아주 복잡하지만 일반적으로 물과 산소에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 물과 산소는 현장의 전기설비에서 충분한 양이 존재한다. 셀룰로오스의 열화는 절연지의 절연성능에 악영향을 끼친다. 권선 절연지의 중합도(the degree of polymerization) 감소는 셀룰로오스의 열화의 중요한 결과이다. 이들의 감소는 절연지의 유전성질에 많은 영향을 미치지 않는다. 그러나 절연지의 기계적 성질에 영향을 주어 만약 변압기 냉각관을 절연지의 작은 조각이 막을 경우 사고의 위험을 크게 한다.

세계적으로 널리 사용되고 있는 대표적인 절연지인 크래프트지는 나무로 만들어지고 있으며, 주성분이 2종류의 화학적인 구조를 지니는 고분자 체인으로 구성되어 있다. 크래프트지의 주성분인 셀룰로오스는 전체 성분의 약 70%를 차지하고 있으며 글루코오스 분자들이 가지가 없는 베타(1-4)글리코시드 결합에 의해서 연결된 고분자량을 가지고 있는 선형 고분자 물질이다. 그밖에 다른 성분인 헤미 셀룰로오스는 셀룰로오스에 비해 낮은 평균 분자량을 가지고 셀룰로오스 섬유와의 결합에 관여하며 종이의 기계적인 강도와 밀접한 관련이 있다.

2.3 가속열화 시험장치 구성

변압기를 구성하는 절연물의 열화 상태를 정확히 평가하기 위해서는 변압기에 실제 부하를 인가하여 열화시킨 후 이를 평가하는 것이다. 이 방법은 많은 비용이 소요되므로 조건을 다르게 하여 반복 시험하는 것이 현실적으로 어렵다. 따라서 실 변압기와 가장 유사하게 열화 상태를 모의하기 위해서 다양한 방법들이 시도되고 있다. 본 연구에서는 보다 정확한 모의시험이 가능하도록 절연지의 열화와 절연유의 열화 장치를 별도로 하여 평가하였다. 절연유의 열화에는 모든 변압기 구성 재료가 영향을 미치므로 가속 열화시 실제 변압기에서 사용되고 있는 재료를 일정한 비율로 하여 동시에 열화 시키는 것이 적당하다. 절연지의 열화 현상은 열적 스트레스를 가장 많이 받는 중간 절연지의 열화 상태를 정확하게 모의하는 것이 중요하다. 권선의 핫스팟 부분에서의 열화를 모의하고자 별도의 시험 장치를 제작하였다. 이때 코어 재료와 프레임 재료 등은 시험장치 내부 용적의 제약상 별도로 넣지 않고 시험하였다. 가속열화 평가를 위한 시험은 변압기 수명 손실률이 절반으로 될 때 종료하여 평가하였다.

2.3.1 절연유 가속열화 시험장치

절연유의 가속열화 시험을 위해 그림 2.2와 같은 열화 셀을 고안하여 시험하였다. 스테인리스 재질의 원통형 열화 셀 내에 최근 두상변압기에 많이 사용되고 있는 셀룰로오스 절연지, 동선(PEW), 철심(규소강판), 절연유(광유 1종2호) 등을 50[kVA]급 변압기와 동일한 비율로 넣어 밀봉한 후 가열하는 방법으로 열화시켰다. 절연유의 계면은 공기로 하였으며 셀의 상부에는 일정압력 이상에서 자동으로 동작하는 밸브를 설치하였다. 본 연구에서 절연유 열화시험은 절연유의 내열온도를 고려하여 열화 온도는 130[°C]로 하였다. 이 경우 권선온도상승이 55[°C]

인 변압기의 권선최고온도에 따른 수명 손실률은 130[°C]에서 3000시간 열화시킬 경우 대략 절반 정도가 되는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 방법으로 열화시킨 절연유의 절연내력은 KSC 2101의 규정에 의해 측정하였으며 유전열분석기(WinDETA system)로 유전을 및 유전정점을 측정하였다.

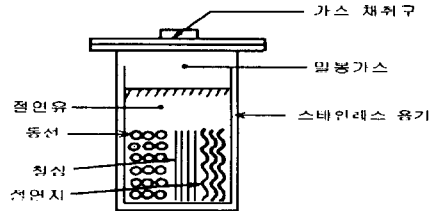


그림 2.2 절연유 가속열화 시험장치

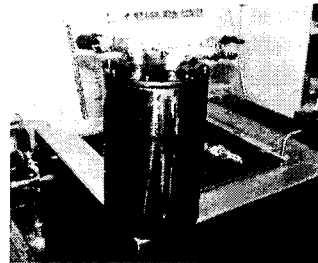


사진 2.1 가속열화 시험 셀

2.3.2 절연지 가속열화 시험 장치

절연지 열화를 위해 제작한 시험 장치는 사진 2.1과 같이 배전용 변압기 권선과 유사한 형태로 구현하였다. 실제 변압기 운전 환경에서 과부하시 발생하는 권선부분의 열을 모의하기 위해 변압기 권선 형태의 히터를 제작하였으며, 히터 표면온도의 균일성을 검증하여 사용하였다. 절연지 열화를 위한 열원 제작된 타원 형태의 가열 히터 위에 에나멜 코팅된 1차 동선(AIW, 2.0 mm)을 균일하게 감고, 그 위에 절연지를 4층으로 감고 다시 에나멜 동선을 감아 고정 하였다. 이러한 방법은 변압기 1차권선 제조 방법과 동일하다고 할 수 있다. 이와 같은 방법으로 열화 대상 절연지 샘플이 고정되고 절연유가 채워진 기밀 용기 내에 넣고 히터 온도를 90°C로 하여 충분한 시간동안 안정화시켰다. 열화 셀 내부의 온도를 측정하고 제어하기 위해 히터 표면과 절연유 상부 및 하부에 온도센서를 설치하였다. 절연지에 가해지는 열적 스트레스는 히터 표면에 설치한 온도센서를 이용하여 자동으로 조절되게 하였다. 시험에 적용된 모의 최고온도는 160°C로 하였으며, 이 경우 ANSI/IEEE C57.91의 수명기대곡선에 따르면 수명 기대치가 500시간 정도가 된다. 이때 시험장치의 절연유 상부 온도는 132°C이었으며, 절연유 상부와 하부의 온도차는 약 20°C 정도가 되었다. 열화 방법은 9시간은 히터에 전원을 공급하여 160°C로 유지하고, 다음 15시간은 히터 전원을 차단하여 상온으로 유지하는 것을 1주기로 하였다. 히터가 동작한 총 시간은 250시간이었다.

2.4 절연지 열화시험 결과

2.4.1 절연내력 측정

열화가 완료된 절연지에 대해 유증 절연파괴 시험을 하였다. 전극은 12.5mm 구대구 전극을 사용하였으며, 절연파괴를 위한 전압상승 및 시험방법은 절연유에 대한 시험방법과 동일하게 적용하였다.

시험결과 열화 전에 비해 절연내력이 약간 감소하는 경향을 보였다. 그림 2.3은 2층에 위치한 절연지의 절연 파괴 특성을 측정된 결과이다. 그림 2.3과 같이 열원과

직접적으로 접하는 부분에 아라미드절연지를 사용한 A와 C의 경우가 B 보다 절연내력 저하가 적은 것으로 나타났다.

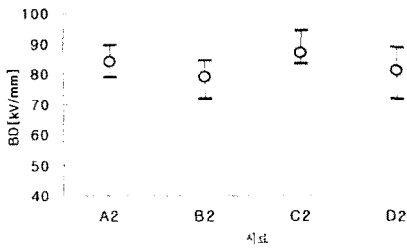


그림 2.3 2층 셀룰로오스지 유중 절연과괴전압

2.4.2 유전특성 측정

그림 2.4는 열화된 셀룰로오스와 아라미드 절연지의 온도 및 주파수에 따른 유전을 변화를 측정하는 것이다. A종 셀룰로오스 절연지의 경우 일정온도 이상부터 온도 증가에 따라 유전율이 급격히 증가함을 알 수 있다. 반면에 아라미드 절연지의 경우 내열 특성이 우수하여 온도 증가에 따라 유전을 변화가 적은 것을 알 수 있다.

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

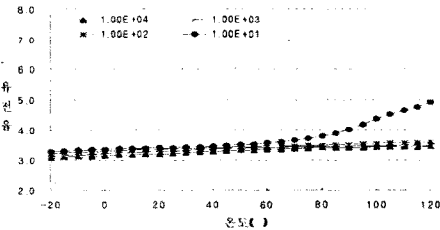


그림 2.4 아라미드 절연지(A1) 유전율

2.4.3 인장강도 측정

절연지의 인장강도 측정은 KSC 2313 '전기절연지 시험방법'에 의하여 하였다. KSC 2313에 따르면 폭 15mm, 길이 250mm의 시험편을 종이의 세로 방향 및 가로 방향으로 각각 5매 이상 채취하여 KS M 7014에 규정하는 인장시험기 또는 이것에 준하는 것을 사용하여 물림 간격을 180±10mm, 인장 시험기의 최대력유 300N(30.6kgf), 인장속도 200mm/min 또는 20±5초로 절단한다. 인장강도가 40N(4.1kgf)/15mm 이하인 것은 인장시험기의 최대력을 100N(10.2kgf)로 하여 10±5초로 절단한다. 인장강도는 절단시의 힘을 시험편의 원래 단면적으로 나눈 MPa(kgf/mm²)로 나타내거나 또는 N/15mm(kgf/15mm) 혹은 열단길이(km)로 나타낸다.

$$T = \frac{F}{S}$$

여기서 T는 인장강도 (MPa), F는 절단시의 힘(N), S는 시험편의 단면적(mm²)이다. 또한,

$$L_d = \frac{1}{9.8} \frac{F}{(W \times b)} 10^3$$

여기서 L_d 는 열단길이(km), F는 절단시의 힘(N), W는 시험편의 단위면적당 무게(g/m²), b는 시험편의 폭(mm)이다. 표 2.1은 열화 후 절연지의 인장강도를 측정 한 값이다. 열화 전 절연지의 경우 7개 시료에 대해 측정하여 평균한 것이다. 셀룰로오스 절연지의 경우 160°C에서 250시간 열화시켰을 경우 인장강도가 초기값의 25~30%로 감소되었다.

표 2.1 열화된 절연지의 인장강도 측정 결과

위치	인장강도 측정 결과 (kgf/mm ²)			
	1층	2층	3층	4층
A	12.0	1.4	1.5	1.6
B	0.65	1.62	1.76	1.95
C	13.2	0.81	1.00	3.29
D	3.25	3.30	0.98	3.63

3. 결 론

변압기의 운전 중에 권선부분에서 발생한 열적 스트레스는 권선중간 절연수명에 직접적인 영향을 주기 때문에 이를 최소화해야 한다. 특히 배전용 변압기는 권선최고온도 부분의 온도 상승을 최소화한 냉각설계 및 내열 특성이 개선된 절연지를 사용하고 있다.

본 연구에서 변압기 절연물의 열화에 대해 고찰하고 열적 스트레스에 의한 중간 절연지 및 절연유의 열화현상을 규명하고자 하였다. 이를 위해 열 열화 현상을 가장 근사하게 모의할 수 있는 시험 장치를 제작하여 열적 스트레스에 따른 절연지 및 절연유의 특성변화를 측정하였다. 가속열화 시험결과 변압기 절연유는 130°C에서 3000시간 열화시킨 경우 열화 시간에 따라 절연내력의 초기값의 절반정도로 감소되었으며, 유전손실은 급격히 증가하였다. 열화시간과 열화 온도가 높을수록 빠르게 증가되는 유전손실과 절연내력 저하는 변압기 수명 감소의 직접적인 원인이 된다. 그러나 상대적으로 절연유의 유전을 변화는 아주 적었다. 광유계 변압기 절연유의 이러한 특성들은 권선 절연 설계시 중요하게 고려되어야 한다. 절연지에 대한 가속열화 시험결과 절연지가 절연유 내에서 열적 스트레스를 받을 경우 열화 시간에 따라 인장강도 감소가 급격히 나타났으며, 열화전에 비해 160°C에서 250시간 열화시켰을 경우 인장강도가 25~30%정도로 감소되었다. 보통 인장강도가 초기값의 20% 정도 되었을 때 절연지가 수명이 다 되었다고 본다. 또한 열화된 절연지는 열화 시간에 따라 유전손실이 증가되고, 유전율이 급격히 증가하였다. 절연지의 유전을 변화는 복합절연물을 사용하는 변압기에서 절연유와 절연지 계면에서 전압 스트레스 불균형을 가져와 부분방전 및 수명단축의 원인이 될 수 있다는 것을 보여주었다. 본 열화 방식은 새로운 절연방식의 변압기 설계 기본 데이터를 얻기 위한 가속열화 시험방법으로 적절히 활용될 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 노황래외, "배전기자재(저손실주상변압기)의 성능확인 및 특성시험 연구", 전력연구원, 1999
- [2] 김상준외, "지상변압기의 품질개선 및 적용기술개발 연구", 전력연구원, 1993
- [3] Guide for loading mineral-oil-immersed overhead and pad mounted distribution transformers, ANSI/IEEE C57.91, 1981
- [4] R. Blue, D. Uttamchandani, O. Farish, "Infrared Detection of Transformer Insulation Degradation Due to Accelerated Thermal Aging" IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol.5 No.2, 1998
- [5] Masayuki Sakai, Naoki Kobayashi, Nobuyuki Daikuhara, "Research on Insulation Paper Thermal Deterioration in Oil Immersed Transformer Over Load Operation"