

주상변압기 열적 특성 향상을 위한 복합절연 시스템 적용

이병성, 송일근, 이재봉, 김동명, \*한상욱  
한전전력연구원, \*충남대학교

The Study on Application of Hybrid Insulation System for Thermally Upgraded Distribution pole Transformers

BS Lee, IK Song, JB Lee, DM Kim, \*SO Han  
KEPRI KEPCO, \*Chungnam National Univ.

**Abstract** - In this paper, to developing thermally and mechanically upgraded ones, we dismantled pole transformers used in the fields for over 13 years and conducted aged oil analysis. Also, when the cellulose and aramid papers in test cell were aging with oil at 130°C for 3000 hours, with the testing period cellulose paper deteriorated more rapidly than the others. For example dielectric strength and dissipation factor of papers deteriorated with aging time.

For evaluation of thermal aging characteristics, a mineral oil-immersed transformer was constructed with hybrid insulation system comprised of aramid paper and cellulose insulation. A Hybrid system has economic advantages. Cellulose materials are confined to cooler regions of the transformer winding. And aramid papers are served to insulate contact parts of hot conductors.

1. 서 론

변압기에서 발생하는 열화 메카니즘은 과부하 고온 운전에 따른 열적 열화현상과 외부 단락전류 유입에 의한 단시간의 열적 열화현상, 전자기적 기계력에 의한 손상현상, 부분방전에 의한 열화 현상이 대표적이다. 이러한 열화현상은 절연지의 전기적, 기계적 성능을 저하시켜 결국 절연파괴 사고로 진전하게 된다.

일반적으로 배전용에 사용되고 있는 변압기는 셀룰로오스(Cellulous) 절연지를 층간 절연지로 사용하고 팽유에 함침시킨 구조로 이루어져 있다. 변압기가 자신의 내량 이상으로 급격한 부하변화를 받게 되면 내부에서 발생하는 높은 온도에 의해 층간 절연지가 열화되게 된다.

또한, 셀룰로오스 재료의 재료가 고온에서 운전되거나 기름에 들어갔을 때는 셀룰로오스 사슬이 깨진다. 셀룰로오스의 열적인 열화는 절연지 절연성능에 악영향을 끼치며 전기적 및 기계적인 성질에 영향을 준다. 셀룰로오스의 열화는 절연유의 변색을 가져오며 오일내의 수분함량증가, 절연유와 절연지의 유전특성을 저하시킨다. 따라서 변압기 설계시 열적으로 안정하게 설계하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 열적, 기계적으로 성능이 향상된 주상 변압기를 개발하고자 하였다. 변압기의 열적특성을 향상시키기 위해 권선의 층간절연지를 고온절연지인 아라미드지(Aramid paper)와 셀룰로오스지를 복합적으로 적용하였다. 고온절연지는 변압기 권선에서 온도상승이 큰 부분에 적용하였으며, 상대적으로 열적 열화를 적게 받는 부분은 셀룰로오스지를 사용하였다.

기존에 사용되고 있는 변압기 권선의 온도분포 특성을 파악하기 위해 과부하시 권선내부의 온도를 실측하였으며, 복합절연을 적용하였을 경우 상대적인 셀룰로오스 절연지의 열화 진행 정도를 분석하였다. 또한 절연성능에 크게 영향을 주는 절연지의 수분흡수 특성을 평가하는 실험을 행하였다.

2. 본 론

2.1 권선내부 온도 측정

부하증가에 따른 권선내부의 온도상승을 측정하기 위해 변압기 제조시 권선내부시 온도를 실측할 수 있는 센서를 설치하였다. 권선온도 측정을 위해 사용된 시작품 변압기는 저손실형 주상변압기 50kVA급(외철형)으로 하였다.

센서는 절연유 순환에 의한 냉각 작용을 고려하여 수직방향으로 변압기 권선의 상부에서 1/3 지점을 선택하였다. 반경방향에 대해서는 그림 1과 같이 일정한 간격으로 설치하였다. Coil end 부분과 Coil leg 부분으로 나누어서 센서를 설치하였으며, 2차 저압권선과 유덕트(oil duct), 1차권선 층간으로 구분하였다.

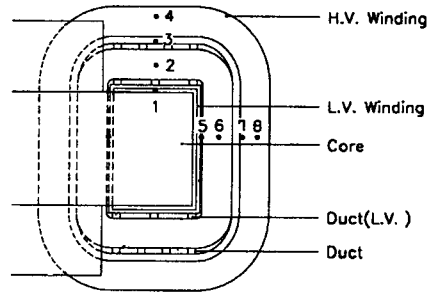


그림 1. 권선의 센서설치 위치

권선 내부의 온도 측정을 위해 변압기 정격의 100%, 130%, 160%의 과부하를 모의하였다. 권선내부의 온도측정 결과는 표 1과 같다. 과부하 정도에 따라 온도는 급격히 증가하였으며, 예상했던 것처럼 코어(core) 부분의 온도가 가장 높았다. 특히 1차 권선 중앙층의 온도가 가장 높았다.

표 1. 변압기 권선의 온도분포

센서 위치	측정온도(°C)		
	100%부하	130%부하	160%부하
1	69.0	112.0	157.0
2	63.0	108.0	160.0
3	79.0	136.0	158.0
4	63.0	109.0	165.0
5	72.0	124.0	188.5
6	71.0	123.0	184.5
7	80.0	138.0	200.0
8	68.0	119.5	180.0

## 2.2 절연지의 특성 비교..

### 2.2.1 인장강도 측정

절연지의 인장강도를 측정하기 위해 인장강도시험기 (INSTRON 4204)를 사용하였으며, 시편은 두께 0.18 mm, 폭 15 mm, 길이 200 mm를 사용하였다. 인장속도를 50mm/분으로 하였다. 셀룰로오스계와 아라미드계 절연지에 대해 인장강도를 측정하여 비교하였으며, 5개의 동일 시료에 대해 5회 측정하였다. 또한 절연지의 바니시 함침에 따른 특성을 비교하였으며, 측정된 결과를 표 2에 나타내었다.

바니시를 함침한 경우 셀룰로오스지는 함침으로 인해 두께가 약 5%정도 증가하였지만 인장강도는 약 50% 증가 하였다. 반면에 아라미드계 절연지의 경우 바니시 함침에 따라 인장강도가 약간 증가하였음을 알 수 있었다. 이는 바니시 함침시 절연지의 바니시 흡수율의 차이 때문인 것으로 생각된다.

표 2. 절연지의 인장강도 측정

시료	셀룰로오스(kgf/15mm)		아라미드(kgf/15mm)	
	신품	바니시	신품	바니시
1	10.07	15.38	30.74	36.97
2	9.93	17.32	33.96	36.00
3	10.74	15.70	32.03	37.58
4	9.64	15.84	31.49	36.00
5	10.42	17.69	31.84	35.46
평균	10.16	16.39	32.01	36.40

### 2.2.2 수분흡수 특성

복합절연에 사용될 셀룰로오스와 아라미드계 절연지를 동일한 크기로 절단하여 110℃의 오븐에서 12시간동안 건조하였다. 바니시에 함침시킨 시료의 경우 동일온도에서 12시간 이상 충분히 건조한 후 바니시 함침을 하였으며, 동일 조건에서 함침한 시료를 건조하였다.

절연지의 수분 흡수 특성을 파악하기 위해 건조한 절연지 시료를 대기중(온도 15℃, 습도 45%)에 방치한 후 시간에 따른 수분 증가량을 측정하였다.

그림 4는 절연지 시료를 완전건조 후 대기중에 방치하는 시간에 따른 수분흡수 특성을 나타낸 것이다.

시험결과 바니시에 함침한 절연지의 경우도 대기중에서 수분을 흡수하는 것으로 나타났다. 셀룰로오스 절연지의 경우는 바니시 함침시료와 함침하지 않는 시료와의 수분흡수 특성에서 큰 차이를 보였으나 아라미드 절연지의 경우는 큰 차이가 적었다.

수분흡수량은 시간 경과에 따라 점차 증가하였으며, 습도가 50~60% 정도로 증가된 800시간 이후에는 대기중의 습도 증가에 의해 수분 흡수량이 상당히 증가하였음을 알 수 있었다.

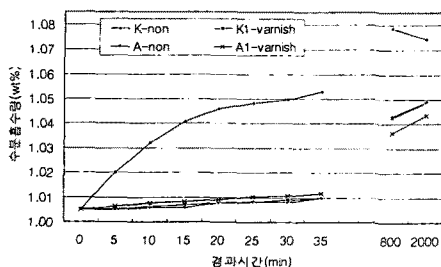


그림 2. 대기중 방치시간에 따른 수분흡수 특성

### 2.2.3 열화에 따른 인장강도 변화

일반적으로 절연지는 열적 열화에 의해 기계적인 인장강도가 저하된다. 따라서 열화 시간에 따른 인장강도를 측정하였다.

인장강도 측정을 위한 시료는 권선온도 160℃, 절연유 온도 130℃로 하여 절연지를 열화 시켰다. 그림 3은 열화에 따른 인장강도 변화를 나타낸 것이다.

열화에 따른 인장강도 변화를 측정된 결과 아라미드 절연지의 경우는 열화전과 거의 변화가 없었지만, 셀룰로오스 절연지의 경우는 열화시간에 따라 급격히 인장강도가 저하됨을 알 수 있었다. 여기서 권선과 접하는 부분에 고온절연물인 아라미드 절연지를 사용하고 그 위에 셀룰로오스 절연지를 사용한 경우 인장강도 저하가 훨씬 둔화됨을 알 수 있었다.

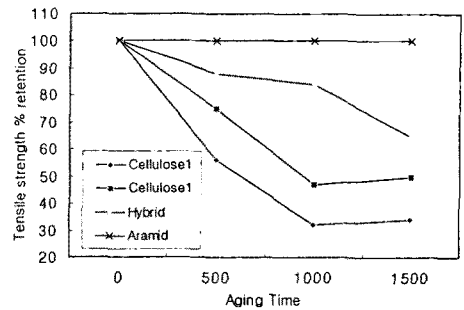


그림 3. 열화에 따른 인장강도 변화

### 2.3 복합절연 적용

유압 주상변압기 권선에 사용되는 주재료로서 도체에는 주로 동이나 알루미늄이 사용되며, 층간 절연을 위해 일반적으로 셀룰로오스계인 A종 절연물이 사용되고 있다.

본 연구에서는 주상변압기의 열적 특성을 개선하기 위해 권선의 층간절연지로 셀룰로오스지와 아라미드지를 복합적으로 적용하여 시제품을 제작하였다.

변압기 권선의 고온부분에서 열적 취약성을 개선하기 위해 고온절연물인 아라미드계 H종 절연지를 적용하였다. 권선의 모든 절연물을 아라미드계로 대체할 경우 경제적인 부담이 증가하므로 권선 내부 온도를 실측하여 핫스팟(Hot-spot) 부분에 대해서만 적용하기로 하였다. 따라서 열적특성을 향상시켜 내구성, 수명 등에 우수한 효과를 기대하였다.

시제품으로 제작한 변압기 권선의 경우 권선온도상승을 높일 수 있고, 1차측 권선에 삽입되는 일부 유덕트(oil duct)를 생략할 수 있으므로 특성을 향상시킬 수 있을 것이라 판단된다.

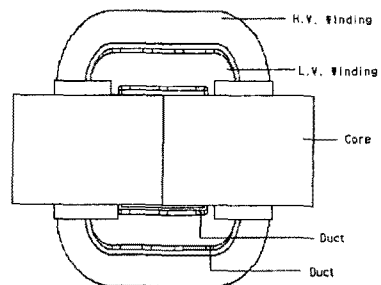


그림 4. 시제품 변압기 권선

## 2.4 복합절연 적용 변압기의 특성 평가

복합절연 방식을 적용한 주상변압기 시제품에 대한 특성평가 결과 동일 용량의 기존 변압기에 비해 다양한 장점이 있다는 것이 기대되었다.

향후 복합절연을 적용한 시제품 변압기가 기존 방식으로 설계된 유입 주상변압기에 비해 열적 및 기계적 특성이 향상되어 변압기 수명이 연장될 것으로 판단되며, 이에 대한 평가가 이루어질 것이다.

## 3. 결 론

본 연구에서는 유입 주상변압기의 열적, 기계적 성능을 향상시키고자 권선 절연을 복합절연 방식을 적용하였다. 변압기 열적특성을 향상시키기 위해 권선 층간의 온도분포를 고려하여 고온절연지인 아라미드지(Aramid paper)와 셀룰로오스지(Cellulose paper)를 복합적으로 적용하였다.

이와 같은 절연시스템을 적용시 기존 방식으로 설계된 유입 주상변압기에 비해 다음과 같은 장점이 기대된다.

- 1) 과부하에 대한 특성이 개선되므로 권선의 층간 절연성능이 향상된다.
- 2) 권선온도 65℃ 변압기로 설계하여 크기 및 중량을 줄이는 설계가 가능함.
- 3) 권선 절연지의 열 열화 특성 및 인장강도가 향상되어 변압기 신뢰성 향상 및 수명 연장이 가능함.

### [참 고 문 헌]

- [1] 이병성 외 3인 "과부하 및 경년변압기 절연유 열화특성 분석 연구", 한국전기전자재료학회 춘계학술 논문집, pp.203~207, 2002
- [2] 송일근외, "주상변압기 단락강도향상을 위한 바니시 함침 기술 동향", 대한전기학회지, Vol. 49, No. 5, pp. 44-50, 2000. 5. 30
- [3] 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.
- [4] Guide for loading mineral-oil-immersed overhead and pad-mounted distribution transformers, ANSI/IEEE C57.91 1981