

흡습된 에폭시 절연물의 절연 특성

(Insulation Characteristic of Moisturized Epoxy Compound)

김동명, 박영근, 권태호, 최선규, 이병호, 최원석

(Dong-Myung Kim, Young-Keun Park, Tae-Ho Kwon, Sun-Gyu Choi, Byoung-Ho Lee, Won-Suk Choi)

Abstract

가스절연개폐기의 절연물로 사용되는 에폭시가 흡습환경에 노출될 경우 절연내력은 급격히 저하된다. 에폭시 절연물에 함유되어 있는 수분은 어느 일정 온도에서는 가스 내 수분과 평형을 이루고 있지만 온도변화에 따라 수분은 이동되며 또 고전압 인가 시 절연체 표면은 열화 되어 장기간에 걸쳐 침식과 함께 Treecing 현상을 유발시킨다. 본 연구에서는 에폭시 절연물의 절연특성에 미치는 수분의 영향을 파악하기 위하여 실 계통에서 사용된 제품에 대해 AC 내전압시험 및 재료분석을 시행하였다. 분석결과, 표면의 파괴전압은 주수량에 따라 건조삼락전압의 최대 1/5까지 저하되었다.

1. 서론

최근 전력시장의 구조개편 및 경쟁체제가 이루어지는 가운데 전력설비를 더욱 효율적으로 운용할 필요성이 증대되고 있다. 따라서 설비의 성능저하 및 고장원인을 분석함으로써 기존 운용중인 설비를 진단하고, 개발되는 설비의 품질을 개선할 수 있는 방안 모색이 필요하다.

특히 개폐장치는 전력계통에 있어서 부하와 직접 접속되어 차단·투입되는 통전설비로 사용되므로 개폐장치의 고장은 산업설비의 제어불능과 정지를 의미한다. 또한, 배전계통에서는 고가의 광범위한 정전을 유발함과 동시에 전기품질의 저하의 원인이 된다. 따라서 에너지 산업의 경쟁체제하에서 배전계통 신뢰도 및 전력품질을 높여 고객이 만족하는 전력을 판매하기 위해서는 선로운영에 기본이 되는 차단기·개폐기류의 품질확보가 우선적으로 제고되어야 한다.

본 본문에서는 최근 배전사업소에서 내용 년수 이전에 고장이 발생한 25.8kV 가스절연부하개폐기(지중용)의 원인을 규명하고자 고장제품을 분석하였다. 분석 결과, 반복적으로 발생한 지상개폐기의 내부 절연고장의 원인은 에폭시 절연물의 표면 절연에 문제가 있는 것으로 판단되었다.

2. 실험

2.1. 고장현상 및 해체조사

우수한 전기적, 기계적 특성을 가진 에폭시는 1990년대 초 국내 지중배전용 가스절연부하개폐기의 절연물로 사용하였다. 그러나 에폭시가 가스의 절연 성능을 떨어뜨리는 주요 요인 중 하나인 수분을 흡수하여 저장하는 것이 밝혀짐으로서, 현재는 다른 절연물로 대체 사용되고 있다.

도체의 지지 및 상간 절연을 위해 개폐기 내부에 취부되는 에폭시 절연물의 구성은 그림 1과 같다. 에폭시 절연암(Epoxy섬유질, 절연내력 25~28kV/mm)의 상 간격은 약 12~14cm로 이격되어 있으며 상도체인 연동판(Shunt)을 부착하기 위해 동판나사를 사용하였다. 공간적으로는 SF₆ 가스가 밀봉되어 있는 구조이다.

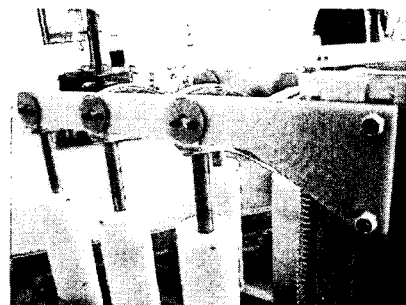


그림 1. 절연암(정상상태)
Fig. 1. Moving arm(normal)

그림 2는 최근 에폭시 절연물에서 상간단락 고장이 발생한 지상개폐기 12대의 사용 년수 현황을 보여주고 있다. 일반적으로 배전기기의 수명은 30년으로 추정하고 있다.

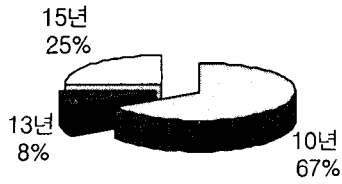


그림 2 고장이 발생한 지상개폐기 현황
Fig. 2. Fault rate of switchgear

고장이 발생한 개폐기의 특징은 다음과 같다.

- 고장 현상
 - 절연암 표면에서 그림 3과 같은 트래킹 현상이 관찰되었다.
 - 동판나사는 3상 모두 절연암의 상부 방향이 심하게 열적 손상된 것이 관찰되어 고장전류에 의한 섬락경로는 그림 4와 같이 진행된 것으로 판단된다.
- ※ 서지 또는 전계에 의한 섬락 시 경로는 최단 거리인 동판나사간 직선으로 진행됨.

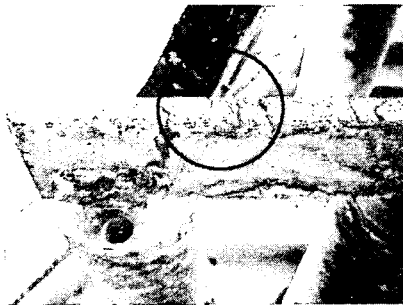


그림 3 절연암 트래킹
Fig. 3. Tracking of moving arm

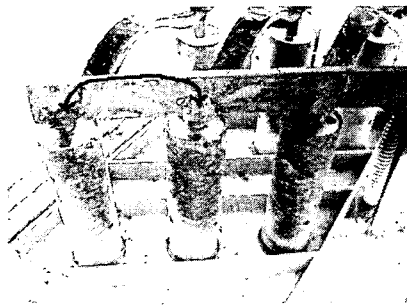


그림 4. 섬락경로
Fig. 4. Flashover path

- 특히, 절연암 상부의 트래킹현상(그림 5)은 누설 전류에 의해 발생하므로 고장 전에 이미 열화가 진행된 것으로 분석된다.
- 차단부의 변형이나 회로의 도체 간 단락 또는 이탈 등 구조적 결함은 발견되지 않았다.
- 탱크 내부에는 방습제가 부착되어 있었고 부식현상은 발견되지 않아 가스 내 수분의 영향은 없었던 것으로 판단된다.

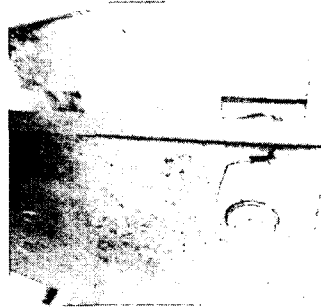


그림 5. 트래킹
Fig. 5. Tracking of moving arm

2.2. 현미경 관찰

시료는 정상 운전 중인 개폐기에서 채취한 시료(94년 10월 제조, 정상시료) 2개와 고장이 발생한 개폐기에서 채취한 시료(94년 10월 제조, 고장시료) 2개를 대상으로 절연암의 표면을 전자현미경(Nikon microphoto-FTA)으로 관찰을 하였다. 표면은 에폭시, 섬유질, filler의 복합체로 구성되어 있었으며 그림 6의 정상시료의 검은 점은 Filler로 추정된다. 그림 7과 같이 고장시료에서는 섬유가 표면으로 노출되어 있는 것이 관찰되었으며 이 경우 표면은 절연 및 오손에 취약한 것으로 판단된다.

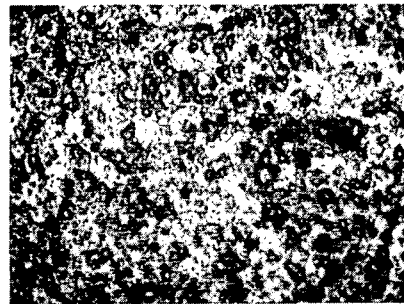


그림 6. 정상시료(×25)
Fig. 6. Normal specimen of epoxy

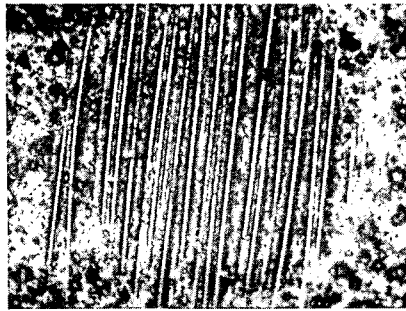


그림 7. 표면으로 섬유노출(×25)
Fig. 7. Glass fiber exposure(×25)

2.3. 모의 절연파괴시험

절연암의 섬락전압 비교 및 섬락경로를 추정하기 위해 파괴시험을 실시하였다.

건조 섬락시험은 절연암의 상간 섬락이 발생할 때까지 상용주파 전압을 인가하여 절연파괴 시 전압을 측정하였으며, 주수 섬락시험은 절연암 표면에 주수(Spray, 전도도 190 μ S, 18 $^{\circ}$ C)량에 따른 절연암의 파괴전압을 측정하였다(그림 8).

시험기기는 AC 내전압시험기(HAEFELY, 100kV)를 사용하였다.

에폭시 절연암의 표면이 건조할 경우에는 표 1의 결과와 같이 우수한 절연상태를 유지하지만 표면에 수분이 부착한 경우는 절연파괴전압이 표 2의 결과와 같이 급속하게 저하됨을 확인할 수 있었다. 주수섬락시험 후 그림 9와 같은 트래킹이 발생하였다.

표 1. 건조섬락시험 결과
Table 1. Result of dry AC withstand voltage test

시료	건조섬락시험(연면방전)									
	#01	#02	#03	#04	#05	#06	#07	#08	#09	#10
B/D [kV]	110	108	107	107	108	106	129	128	134	133

표 2. 주수섬락시험 결과
Table 2. Result of wet AC withstand voltage test

주수섬락시험(연면방전)				
주수회수	1회	2회	3회	4회
절연파괴 전압[kV]	107	60, 64	55, 53	26



그림 8. 주수섬락시험(26kV)
Fig. 8. Wet AC withstand voltage test

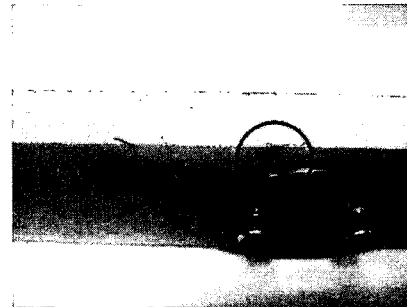


그림 9. 주수섬락시험 후 트래킹
Fig. 9. Tracking after wet AC withstand voltage test

2.4. 연소시험

절연암 표면의 트래킹현상 원인을 규명하고자 연소시험을 실시하였다. 시료는 양호한 절연암을 길이 10 cm의 크기로 절단하여 전기로(Da Woo Scientific Co. 최대 가열온도 : 800 $^{\circ}$ C)에 넣어 가열하였다. 시험 조건은 표 3과 같다.

연소에 의해 균열된 절연암의 상부표면(그림 10)은 누설전류에 의해 발생하는 트래킹 현상(그림 11)과 비교하면 전혀 다른 것을 알 수 있다.

표 3. 연소시험 조건
Table 3. Condition of burning test

시험순서	시험온도	시간(분)	비고
1	300 $^{\circ}$ C	1	변화없음
2	300 $^{\circ}$ C	3	약간 탄화
3	500 $^{\circ}$ C	1	"
4	500 $^{\circ}$ C	3	표면 균열

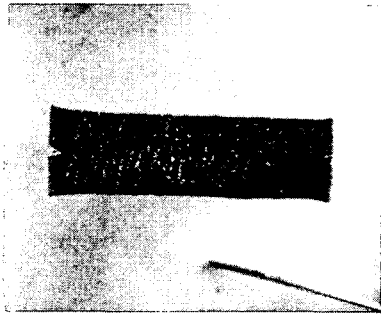


그림 10. 연소시험 후 (500℃, 3분)
Fig. 10. After burning test

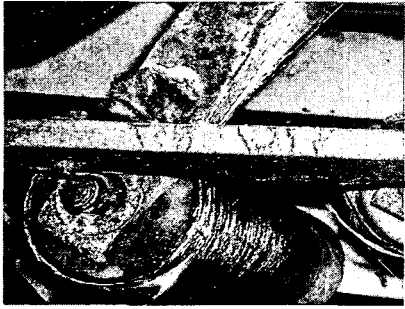


그림 11. 주수흡착시험 후 트래킹
Fig. 11. Tracking of moving arm

로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] "배전보호협조", 한국전력공사 중앙교육원, 1997.
- [2] "배전기기 통계자료", 한국전력공사, 2003.
- [3] "고장분석 및 예방대책", 한국전력공사 배전처, 2002년.
- [4] "Preventing Failures in Outdoor Distribution-Class Metalclad Switchgear", IEEE PAS-104, No.10, October 1985.
- [5] "IEEE Guide for Diagnostics and Failure Investigation of Power Circuit Breaker", IEEE Std C 37.10, 1995.
- [6] "Final report on high-voltage circuit breaker reliability data for use in substation and system studies", CIGRE 13-201, 1994.

3. 결과 및 고찰

고장개폐기는 절연암이외 개소에서는 고장의 흔적이 확인되지 않았다. 따라서 고장은 절연암에 국한될 경우, 고장에 영향을 줄 수 있는 요인으로는 다음과 같다.

- 전계 : 3중점 효과에 의한 전계 집중
- 외부 영향 : 서-지 및 흡습
- 절연물 : 에폭시 결합

상기의 분석결과, 에폭시 절연암은 AC전원 공급 중 기본수지(epoxy resin)와 첨가제(filler)의 계면 갈라짐이 발생하였으며, 이때 함유된 수분은 표면의 침식과 함께 트래킹을 가속시킨 것으로 분석된다.

4. 결 론

가스절연개폐기의 절연물로 사용되는 에폭시가 흡습환경에 노출될 경우 절연내력은 급격히 저하된다. 에폭시 절연물에 함유되어 있는 수분은 어느 일정 온도에서는 가스 내 수분과 평형을 이루고 있지만 온도변화에 따라 수분은 이동되며 또한 고전압 인가 시 절연체 표면은 열화되어 장기간에 걸쳐 침식과 함께 트래킹현상을 유발시키는 것으로