

고압폐쇄분전반의 전력케이블 헤드와 안전셔터에서의 사고위험 평가

(Accident Risk Assessment between Power Cable Head and Safety Shutter
in Medium Voltage Metal-Clad Switchgear)

송길목* · 한운기 · 김영석

(Kil-Mok Shong · Woon-Ki Han · Young-Seok Kim)

전기안전연구원

(Electrical Safety Research Institute, subsidiary of Korea Electrical Safety Corporation)

Abstract

This paper describes the accident analysis by modelling the current transformer mounting in medium voltage metal-clad switchgear(MCSG). In analyzing the accident, the reconstruction at the current transformer mounting(VCB connecting guide) has to be taken into account. The accident was modelled as a 3-phase ground fault occurring between the end plate of a high voltage lines and the safety shutter at the current transformer mounting of the VCB inside the metal clad switchgear. Since the outside maintenance of the metal clad switchgear is restricted by the enclosed compartments, its circumference has to be kept clean. Through the reconstruction results, it was confirmed that the fault of the enclosed switchboard could be reduced when the shutter made of Fe material was changed into an insulation.

1. 서론

편리하고 유효한 사회기반 시설의 대부분은 전기에너지를 이용한 것으로 과학발전과 더불어 매우 중요한 에너지로 인식되고 있다. 최근, 전기에너지를 이용한 다양한 신제품과 설비가 출시되면서 이에 대한 안전 확보가 중요하게 되었다. 이에 전력공급과 수요의 대용량에 따른 안정성에 대한 신뢰성 기술 및 평가가 중요한 기술로 자리매김하고 있다. 신뢰성 공학(reliability engineering)은 20세기 중반에 군사적 목적으로 인해 신뢰성의 개념이 적용되면서 시작되었으나 현재에는 사회 전반에 걸쳐 전력품질의 향상과 안정성 향상을 위한 신뢰성 관련기술은 발전을 거듭하고 있다. 전기에너지의 안전한 이용을 위한 전기안전기술은 전력기반기술의 안정성을 확보하기 위한 중요기술 중 하나로서 전력설비 모니터링과 분석을 통한 다양한 설비의 사고예측을 통해 미연에 재해를 방지하는 시스템 구축에 그 목적이 있다. 전력품질의 개선을 위해선 그 원인을 분석할 수 있는 전반적인 시스템 해석기술이 필요하다.

전기에너지의 잘못된 이용이나 관리의 소홀에서 비롯된 전기재해는 크게 설비사고에 의한 정전, 시스템 오류 등이 있으며, 감전이나 화재로 전이되어 부차적인 사고로 이어지기도 한다. 특히 전기화재의 경우 관리의 소홀한 야간에 주로 발생하고 있으며, 장시간 방치에 의한 사고가 주를 이루고 있다 [1][2]. 특히 매년 3만 건 이상의 화재 중 전기화재의 비율이 약 만 건 정도로 가장 높은 점유율을 보이고 있어서 원인분석을 물론 예방에 대한 연구가 필요하다. 전기화재는 인적 물적 피해뿐만 아니라 환경 파괴요인으로서의 원인이 되고 있다.

최근 대용량화되고 있는 전력설비를 공간적으로 최소화하기 위해 폐쇄분전반의 개발이 활성화되고 있으나 사고가 발생하면 많은 인적 물적 피해가 초래되어 이에 대한 사고원인을

분석하고 향후 사고방지를 위한 개선이 필요하게 되었다. 따라서 본 논문에서는 실제 사고현장에서 수거한 대상물을 이용하여 재료분석과 사고재현을 통해 원인분석을 체계화 하였다.

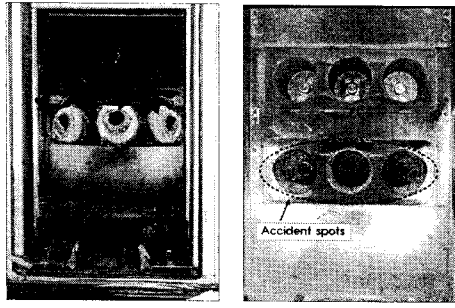
2. 본론

2.1. 폐쇄분전반내의 사고추론

사고추론(An accidental inference)은 기 발생한 설비사고에 대해 다양한 가능성을 제시함으로써 분석기법의 적용과 사고 재현을 위한 다양한 검증방법을 선택하는데 의의가 있다[3].

국내에서 조사되고 있는 사고의 특성을 보면, 고전압 이상에서의 방전은 다양한 경로를 통해 가능하다. 일반적으로 전기설비사고가 발생할 수 있는 요인으로는 이물질 침투, 절연물 배합불량, 미달 등의 제작 불량, 수분침투, 외피손상, 산화 등의 관리 소홀이나 경년열화, 물리적 스트레스에 의한 설치 불량 등이 있다. 절연파괴의 과정은 극간에서 발생할 수 있고, 전극과 대지간에서도 발생할 수 있다. 절연재료가 열에 의하거나 먼지, 수분과 같은 주변 영향 등에 의해 발생할 수 있다.

본 사고는 진공차단기를 수납, 활용하는 폐쇄분전반 내부의 진공차단기의 전극을 인입, 인출하는 인출부의 삽입부에서 발생한 방전사고로서 사고대상물은 그림 3에 나타났다. 삽입구는 전체적으로 표면이 탄화되어 있고, 셔터 역시 세 군데 모두에서 용융되어 있었다. 사고당시 사용되지 않은 상태였으며, 삽입구에서 차단기가 인출된 상태였다. 방전은 고전압 부분에서 발생하였다. 그림 1(a)의 경우 안전셔터부분에서 방전에 의해 철재가 용융된 것을 확인할 수 있다. 그림 1(b)는 삽입구 내부로서 표면이 탄화된 흔적을 확인하였다.

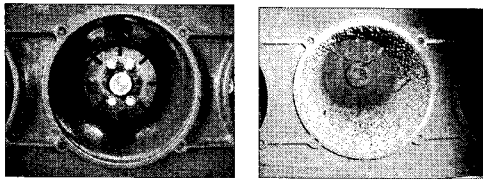


(a) aged safety shutter (b) accident spots

그림 1. 열화된 VCB 패널

Fig. 1. Deteriorated VCB panel

그림 2는 삼입구의 내부를 촬영한 것으로 그림 2(a)의 정상 상태와 비교하여 그림 2(b)는 표면에 불규칙한 면으로 탄화되어 있으며, 중앙의 전극은 용융된 것을 알 수 있다.



(a) normal (b) aged

그림 2. 삼입구 내부 비교

Fig. 2. Comparison between inside of parenthesis

일반적인 형태로서는 절연파괴가 진행된 것이며, 연면 또는 기중 방전에 의한 것으로 추정된다. 검사기준에서는 폐쇄분전반의 경우 22.9kV에서는 200mm의 이격거리를 두어야 하며, 권장사항에서도 220mm 정도를 절연이격하면 안전하다고 명시되어 있다. 따라서 본 사고 물품의 경우 전극과 셔터사이의 거리는 약 220mm로 안전한 것으로 확인되어 설치와 제작상에서는 사고의 원인이 될 수 있는 사항이 나타나지 않았다. 재료분석 이외에 사고모델로서 수분, 그리고 먼지 및 수분이 있는 각각의 경우를 검증하여 가장 가능성이 있는 주변 환경 및 관리 등이 원인이 되는 경우의 사고패턴을 입증하고자 하였다[4][5].

2.2. 실험방법

사고패널에서 발생할 수 있는 사고 조건은 일반적인 사항(normal), 수분이 표면에 분포된 상태, 수분과 먼지 등 이물질이 부착된 상태 등으로 구성하였다. 실험에 이용된 회로의 구성을 동일하게 한 후 사고모의 챔버 내부에 다양한 사고패턴을 만들어 가장 사고가능성이 높은 조건을 추출하고자 하였다. 그림 3에서의 순서에 따라 사고현장에서 수거된 분석품의 발화패턴을 확인하고 사고의 원인이 되는 다양한 열적 영향을

분석한다. 다음으로 산화 또는 탄화된 재료의 분석을 주사전자현미경, 에너지 분산형 분광분석기, 열분석기, 적외선분광기 등으로 실시하였으며, 이를 근거로 사고발생 가능성이 있는 경우에 대해 모델챔버를 구성하여 실험하였다.

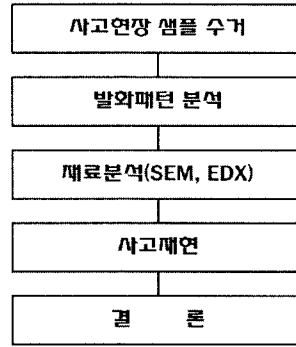


그림 3. 실험의 개략도

Fig. 3. Schematics of experiment

사고모의 구성은 그림 4와 같은 형태로 제작하였다. 방전과정은 고속카메라에 의해 촬영되었으며, 촬영속도는 초당 1,000장으로 하였다. 절연파괴 되었을 때의 전압을 측정하였으며, 전극과 챔버는 사고패턴마다 동일하게 구성하였다. 전극은 순동으로 제작하였으며, 셔터부분은 철로 구성된 사각 평판을 이용하였다. 순동 전극과 철 평판의 거리는 사고현장에 설치되었던 삼입부 길이와 동일한 220mm로 하였다. 순동의 전극에 전압을 상승시키며, 이때 절연파괴 전압을 측정하였다. 이때 실험 조건으로 온도 10℃, 습도 60%의 분위기를 유지하였다.

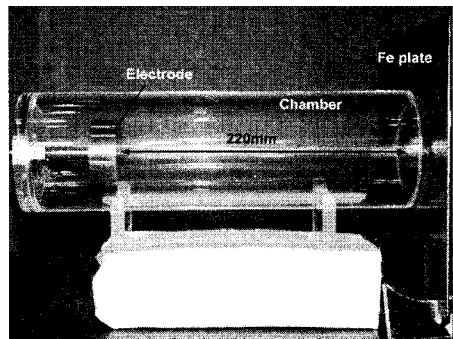


그림 4. 모델챔버

Fig. 4. Model chamber

2.3. 실험결과 및 분석

(1) 재료분석

그림 5는 셔터의 정상부분을 나타낸 것이다. 성분은 탄소 4.3%, 철 87.4%, 이연 8.3%로 나타났다. 이는 주성분이 철로서 구성되어 있으며, 아연이 도금되었던 것으로 확인되었다.

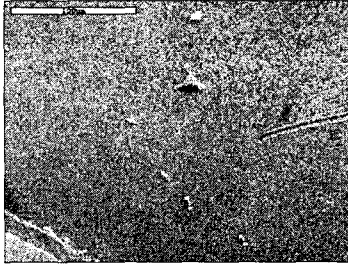


그림 5. 정상 셔터의 2차 전자 이미지

Fig. 5. Secondary electron images of normal shutter

그림 24는 셔터의 용융부분을 나타낸 것이다. 성분은 탄소 5.7%, 산소 33.0%, 철 61.3%로 구성된 것을 확인하였다. 이는 열에 약한 아연도금된 부분이 열에 의해 증발된 것으로 보이며, 주변의 탄소와 공기 중의 산소에 의한 산화반응이 있었던 것으로 확인되었다. 따라서 사고 셔터는 국부적으로 매우 높은 열이 존재하여 용융되었음을 확인하였다.



그림 6. 열화된 셔터의 2차 전자 이미지

Fig. 6. Secondary electron images of aged shutter

사고 패널 인출구 표면에 있는 탄화 부분과 정상상태의 부분을 각각 채취하여 분당 10°C씩 온도를 증가시키며, 그때의 흡열 및 발열반응에 대해 분석하였다. 그림 7은 시차열분석을 통해 나타낸 그래프이다.

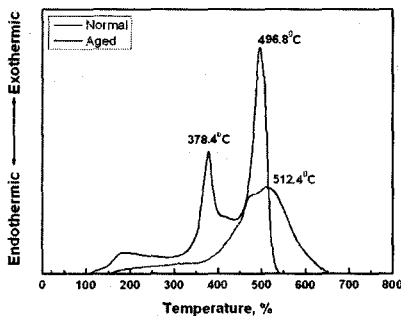


그림 7. MCSG 삽입구의 시차열곡선

Fig. 7. DTA curves of parenthesis of MCSG

정상상태의 절연재료는 약 378.4°C, 496.8°C에서 각각 발열 반응에 의한 발열피크가 나타났다. 그러나 탄화된 부분의 경우 약 512.5°C에서 가장 큰 발열피크가 나타나는 것을 확인하였다. 이는 절연재료의 내부에 있던 주재료 또는 충전재가 열에 의해 증발하여 형성된 것으로 판단된다.

그림 8은 적외선분광기(FT-IR)에 의해 분석한 적외선 흡광 피크 곡선을 비교한 것이다. 그림에서 정상상태의 삽입부 표면은 사고부분과 달리 1724cm⁻¹에서 탄소와 산소의 이중결합 구조로 된 신축진동이 확인되었다. 이는 열적 영향으로 인해 표면이 탄화되면서 산소와 탄소의 이중결합이 분해된 것으로 판단된다.

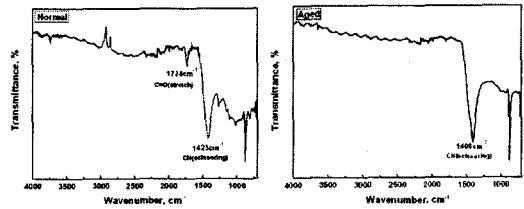


그림 8. MCSG 삽입구의 FT-IR 스펙트럼

Fig. 8. FT-IR spectrum of parenthesis of MCSG

(2) 절연파괴 전압측정

실험을 통해 기중에서 절연파괴 되는 전압은 연면에서 절연파괴 되는 전압보다 높아서 연면에 오염이 된 지점에서 낮은 전압에서 절연파괴가 발생하는 것으로 나타났다. 그림 9는 각각의 실험조건에서 절연파괴 되는 전압을 비교하여 나타낸 것으로 연면 오염이 되지 않은 정상상태의 경우 약 102 kV에서 불꽃방전이 되는 것으로 나타났다.

따라서 수분이 포화된 상태에서 절연이 파괴되는 정도는 정격전압보다 높은 상태였으며, 절연파괴 전압은 약 15 kV로 매우 낮은 것을 확인하였다. 수분과 먼지가 포함된 상태에서 연면방전을 일으키며 절연파괴 되는 과정을 알 수 있었다. 먼지와 수분이 있음으로 인해 폐쇄분전반에서 이용되는 22.9 kV의 전압보다 낮은 전압에서 절연파괴가 발생할 수 있음을 확인하였다.

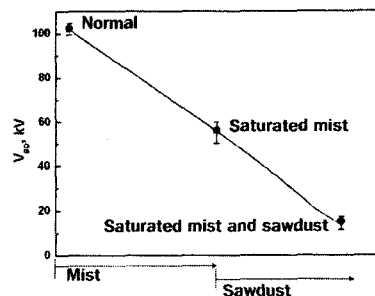
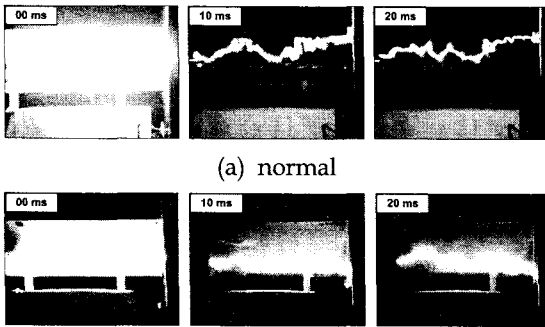


그림 9. 열화조건에 따른 절연파괴 전압 비교

Fig. 9. The comparison of breakdown voltages according to deteriorated conditions

(3) 열화조건에 따른 방전과정

그림 10은 정상상태에서의 방전과정과 수분, 먼지로 오염된 상태에서의 방전과정을 고속카메라에 의해 초당 1,000장으로 촬영한 후 불꽃방전개시부터 5 ms 간격으로 샘플링한 것이다. 초기 불꽃방전시 전류의 크기가 가장 커 불꽃이 큰 것을 확인할 수 있으며 이후 불꽃에 의해 방전로가 형성된 것을 알 수 있다. 방전로의 형태로 보아 기중에서 방전되고 있음을 확인할 수 있다. 그림 10(b)는 분진과 수분이 챔버 내부 표면에 부착된 상태에서 전압을 인가했을 경우 불꽃방전시점부터 방전되는 과정을 고속카메라에 의해 촬영한 것이다. 5ms의 간격으로 나타난 과정에서 일반적인 기중 방전과정과는 다르게 나타났으며, 그림에서도 알 수 있듯이 표면에 연면방전과 기중에서의 방전이 번갈아 가며 발생하는 것을 확인하였다.



(a) normal
(b) aged(mist and sawdust)
그림 10. 방전과정
Fig. 10. Discharge process

3. 결론

사고분석에 있어서 재현성을 확보하는 것은 매우 중요하다. 사고발생 이전에는 설비의 모니터링 시스템을 이용하여 실시간 전기안전 감시시스템을 운영하며, 주기적으로 설비의 다양한 진단을 통해서 열화 유무를 판단한다.

설비사고가 발생한 경우에는 도전재료 및 절연재료의 분석을 통해 과학적으로 입증할 수 있는 자료를 확보해야 하며, 사고모형을 구성하여 재현이 가능하여야 한다.

본 사고는 폐쇄배전반 내부의 진공차단기 전극을 삽입하는 삽입구에서 22.9kV 말단과 셔터에서 발생한 3상 지락사고로서 재료분석과 사고재현을 수행한 것이다.

논문을 통해 폐쇄배전반의 경우 외부에서 관리할 수 있는 한계가 있으므로 사고 방지를 위해 주변의 청결한 상태를 유지할 수 있도록 점검과 관리가 요구되었다.

폐쇄배전반 내부에 위치한 셔터의 경우 현재의 도전성을 가진 철(Fe)재질에서 절연재질로 개선하였을 경우 전기설비사고로 이어지는 단계를 최소화 할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- (1) 한국전기안전공사, "전기재해통계분석", 14호, 한국전기안전공사, pp.67~74, 2005
- (2) 송길목, 최충석, 노영수, 권희로, "트래킹에 의해 열화된 페놀수지의 탄화특성", Trans. KIEE, Vol. 53C, No. 1, pp.1~7, JAN. 2004
- (3) Chung-Seog Choi, Kil-Mok Shong, Hyang-Kon Kim, Dong-Ook Kim, Dong-Woo Kim, "The Analysis of Dendrite Structure of Electric Wire Melted by Fusing Current", 2003J-K Joint Symp. on ED&HVE, pp.145~148, 2003.
- (4) John D. Dehaan, "Kirk's Fire Investigation", 5th edition, Prentice Hall, pp.305, 2002
- (5) Kil-Mok Shong, Hyang-Kon Kim, Chung-Seog Choi and Hee-Ro Kwak, "A Study on the Electrical Fire Analysis of PVC Insulated Flexible Cord by Over-Current", KIEE 2003spring conference, pp.131~133, 2003
- (6) Babrauskas, V., "Fires due to Electric Arcing: Can 'Cause' Be Distinguished from 'Victim' Beads by Physical or Chemical Testing?", Fire and Materials, pp.189~201, 2003