

25.8kV SF₆ 가스절연 부하개폐기의 고장분석 및 성능평가

(Performance Evaluation and Support of Failure Analysis
for 25.8kV SF₆ Gas Insulated Load Breaker Switchgear)

김동명 · 천성남 · 권태호 · 최선규

(Dong-Myeong Kim · Sung-Nam Chun · Tae-Ho Kwon · Sun-Kyu Choi)

Abstract

본 논문은 최근 2년간 25.8kV 가스 절연 부하개폐기에서 발생한 고장을 전력연구원에서 분석하여 고장 원인별 현황을 나타내었다. 고장 주요원인인 절연불량, 기계적 손상, 외부 손상 등이 발생하는 원인을 분석하였다. 가스절연개폐기의 고장모드 및 성능평가 방법을 나타내었다. 개폐기의 장기신뢰성 확보를 위해서는 제조업체 및 한전의 품질개선을 위한 노력이 필요하며 특히, 경년특성을 검증할 수 있는 효율적인 방법의 제시가 필요하다.

1. 서론

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

배전 설비분야 중 차단기 및 개폐기는 전력계통에 있어서 부하와 직접 접속되어 차단·투입, 통전설비로 사용된다. 개폐장치의 고장은 산업설비의 제어불능, 정지를 의미하며, 수용가의 광범위한 정전을 유발함과 동시에 전기품질 저하의 원인이 되고 있다. 따라서 개폐장치의 품질개선 방안이 시급하다.

1.1. 운전현황

2003년 1월 현재 국내 22.9kV-y 배전계통에 설치 운영되고 있는 차단기·개폐기는 보호기기 약 8만대, 지중선로용 개폐기 2만 여대로 총 104,353대이다. 전체 개폐장치의 87.2[%]를 SF₆ 가스절연방식인 Gas Switch와 지중개폐기(Pad. SW)가 점유하고 있다. 표 1은 국내의 배전선로 보호장치 및 개폐기 설치현황을 나타내고 있다[2].

2. 본론

2.1. 개폐기 고장현황

최근 2년간(2003~2004) 국내에서 발생한 25.8kV SF₆ 가스절연부하개폐기의 고장에 대해 전

력연구원에서 분석한 결과, 주요 고장유형은 다음과 같다.

- ① 조작부 : 오·부동작 (부식, Grease 고착, 장치 파손 등)
- ② 차단부 : 전극 접촉불량, 정격을 초과하는 이상전압(TRV)
- ③ 절연물 : 폴리머 절연물의 트래킹
- ④ 부싱 : 부싱내부의 전압 Screen 결함, 전계집중, 보호캡 불량
- ⑤ 엘보우 : 표면손상, Connector의 접촉불량
- ⑥ 기타 : 흡습, 제어회로의 절연 불량

표 1. 배전용 개폐기 설치현황
Table 1. The present state of distribution switch

사용 전압	인터럽터	G/S	개폐기 (지중)	보호기기	기타	계
6.6kV	0	73	149	0	175	397
22.9kV	4,025	68,421	22,151	5,395	3,537	103,529
22.0kV	157	5	259	0	6	427
대수	4,182	68,499	22,559	5,395	3,718	104,353
점유율 (%)	4.0	65.6	21.6	5.2	3.6	100

- 보호기기 : Recloser, Sectionalizer

- 기타 : ASS, ALTS, FAS, A/S, O/S, 지중다회로차단기

* G/S : Gas Insulated Load Break Switchgear

* ASS : Automatic Section Switch

* Interrupter : Interrupter Switch

* ALTS : Auto Load Transfer Switch

그림 1은 분석 지원한 고장개폐기의 부위별 현황을 보여주고 있다. 고장은 절연물의 절연 불량, 기계적 손상, 외부 손상 등이 주요 원인으로 작용하고 있다.

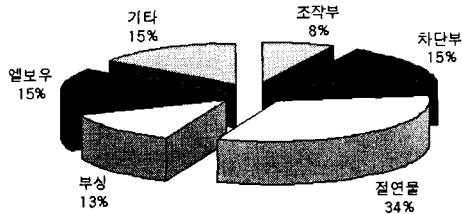


그림 1. 개폐기 고장원인별 현황
Fig. 1. The present state of switch failure cause

2.2. 고장원인별 분석

가. 조작불량

오·부동작은 주로 수동 조작핸들의 부식이나 구동 연결장치의 파손에 의해 발생되며 외부 환경, 습기, 지층의 부식가스가 주 원인인 것으로 분석되고 있다. 또한 제조시 조립불량도 다수 발생하고 있으며 동작불량 고장품 중 제품 생산('98~'02년) 후 2~5년 이내에 발생비율이 42%를 점유하고 있다[3].

그림 2은 연결 부분의 파손에 의하여 3상 일괄 개폐조작 불량(1상 결상)이 발생한 사례이며, 그림 3은 시뮬레이션을 통한 절연체의 인장하중(2 ton)에 대한 응력 분포를 보여주고 있다. 고정판 조립 작업 시의 충격과 핀의 휘어짐으로 인한 응력의 불균형이 파손의 원인으로 조사되었으며 모의한 결과, 글로부 부분(응력: 23.86 kg/mm²)과 홀(hole) 주위가 다른 부분보다 큰 응력(21.21 kg/mm²)이 집중됨이 확인되었다.

제조과정 중 가동전극에 Grease의 과도한 도포가 장기간 미사용후 경화되어 개방/투입 동작 불량원인이 된 사례가 있다. 특히 고착상태가 심한 전극의 경우 그리스(grease)가 하우징에 비산한 흔적이 있는데, 이것은 개방 시 전극에서 발생하는 아크에 의해 그리스가 비산한 것으로 보이며 이러한 과정에서 그리스 자체가 변성 고착될 수도 있어 가동전극의 운동을 방해 한 것으로 분석되고 있다.

그리스의 물성시험을 KS M 2032 규격에 따라 시험한 결과, 표 2과 같이 온도변화에 의해 주도(稠度)가 변함을 알 수 있으며, 따라서 그리스의 과도한 도포는 조작상태에 더 큰 영향을 준 것으

로 사료된다.

그림 4는 구동부의 Shaft와 전극부의 Shaft의 가동범위가 불일치하여 상시 비틀림에 의한 취성 벽개파괴(脆性劈開破壞)¹⁾에 의해 파손된 것으로 분석되었다.

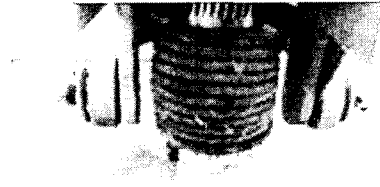


그림 2 수동 동작 핸들의 부식
Fig. 2. Corrosion of manual handle

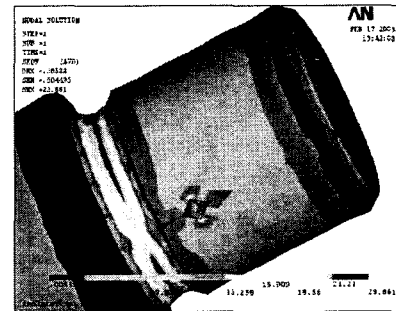


그림 3 응력분포 해석
Fig. 3. Stress distribution analysis

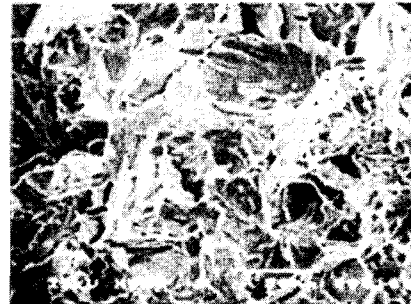


그림 4 벽개파괴(×500, SEM)
Fig. 4. Cleavage breakdown

표 2. 그리스 물성시험
Table 2. The test of grece properties

시험항목		시험치(25℃, 60회 혼화)	특성
혼화 주도	20℃	301	약간 연질
	-25℃	189	약간 경질

나. 부상 결함 및 전극의 접촉불량

자동화개폐기의 제어회로 전원공급을 위해 부상 내부에 전압검출 Screen을 설치하는데, 결함 또는 공극이 존재할 경우 전계집중의 원인이 될 수 있다. 그림 5은 고압부상의 내부 결함에 의한 부분방전 고장을 보여주고 있다(×4, 저배율입체현미경 관찰). 전극의 용손으로 인한 가동접점의 접촉 불량은 개리시간, 소호특성, 통전전류, 가스오염 등에 영향을 미친다.



그림 5. 부상의 내부결함
Fig. 5. The inner defect of busing

다. 자기재 부상의 파손

부상의 파손은 주로 제작 중 냉열성능 불충분, 취급부주의, 전계완화를 위한 도전성물질의 코팅불량, 보이드에 의한 전계집중 등의 원인으로 발생한다. 계절적으로는 O-Ring의 밀착불량 시 수분침투에 의한 냉각 동파가 발생한다. 부상의 성능평가방법은 ES 131. 11항의 흡습시험이 있으며, 시험 후 그림 6와 같이 분쇄하여 흡습의 여부를 확인한다.



그림 6. 흡습시험
Fig. 6. The test of moisture absorption

라. 절연물 불량

개폐기 내부회로의 상간 절연을 위해 에폭시 절연물을 사용하고 있다. 제조 시에 미경화(硬化)된 에폭시 혼합물은 기본수지(epoxy resin)와 첨가제

(filler)의 계면 갈라짐을 유도하며, 그때 함유된 수분은 표면의 침식과 함께 미소 트래킹(tracking)을 발생시키는 것으로 조사되었다[4-5]. 그림 7, 8은 고장이 발생한 절연물의 표면을 나타내고 있으며 입체현미경으로 확대하였을 경우 부분방전이 진행되고 있는 것이 관찰되었다.

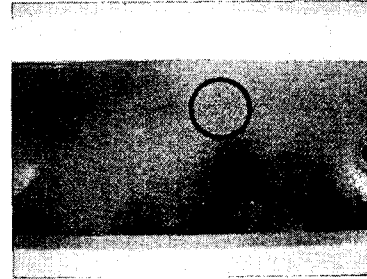


그림 7. 에폭시 절연물의 표면
Fig. 7. Surface of epoxy insulator

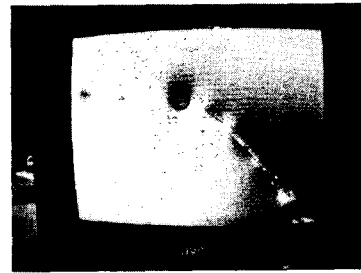


그림 8. 고장전 표면 방전
Fig. 8. The surface discharge before failure

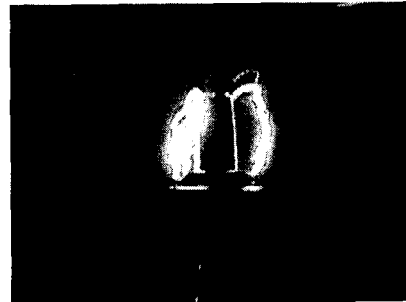


그림 9. 모의 실험(연면방전)
Fig. 9. Surface discharge

마. 개폐기 부상 보호캡에서 3상 단락

개폐기 투입 시 부상 보호캡에서 3상 단락이 발생하였다. 발생 원인은 도전성을 가지고 있는 보호캡(저항율 : $1 \times 10^3 [\Omega \cdot \text{cm}]$, 카본 함유량(TGA²) 측정) : 25%-35%)으로 조사되었다. 그림 9는 고장을 모의한 시험으로, 불꽃방전이 부상 상부도체와 도

전성 커버사이에서 발생하는 것을 확인하였다.

바. 패킹(Packing)의 열화

외부로부터의 수분 투과방지를 위해서는 기밀용 재료의 신뢰성이 필요하며, O-Ring 및 패킹 등의 손상은 내부 가스의 절연성능 저하 및 누기로 인한 가스압력 저하의 원인이 된다. 그림 10는 경년 열화에 의한 O-ring의 표면 crack을 보여주고 있다.

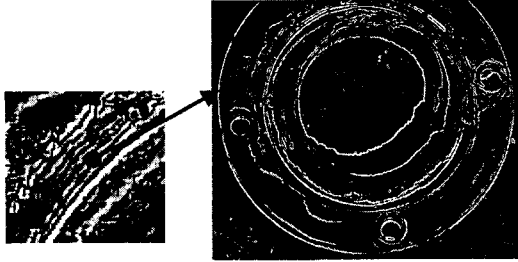


그림 10. O-ring의 표면 crack
Fig. 10. Surface crack of O-ring

2.3. 가스 개폐기 성능평가

가스절연 개폐기의 성능평가방법 및 고장모드는 표 3와 같다.

표 3. 가스개폐기 고장 메커니즘과 시험방법
Table 3. Failure mechanism and test method of gas switchgear

Test Methods Failure Modes/ Mechanisms	내전압 시험	개폐성 시험	전류 개폐 및 투입 시험	고저 온 시험	가속열화 시험		주회로 저항 측정
					열적	장기 과전	
기밀성능	○		△	◎	◎		
절연물	◎		○		△	◎	
조작장치		◎	○				
접점		○	◎				◎
SF6 가스	◎		◎				

* 신뢰성에 관련된 중요도에 따라 표시
: ◎가장 중요 ○ 중요 △ 보통
* Failure Mode/Mechanism은 해당 부품·소재에서 발생할 수 있는 모든 고장 형태를 나타냄
* Test Methods는 해당 발생고장을 일으킬 수 있는 시험방법을 나타냄

3. 결론

본 논문에서는 국내의 23kV 개폐기류의 운용에 있어서 발생되었던 고장 사례를 토대로 여러 가지

고장원인을 분석하였다. 본론에서 언급하지는 않았지만 가스절연개폐기 고장원인의 많은 부분을 차지하는 SF₆ 절연가스에 대한 관리는 현재, 단순히 본체내부의 가스압력만을 확인할 뿐 장기 사용에 대한 성능평가 및 예방진단이 수행되고 있지 않은 실정이다. 국내의 제조 현장여건을 고려해 볼 때 향후 개폐기의 장기신뢰성 확보를 위해서는 제조업체 및 한전의 품질 개선을 위한 지속적인 노력이 필요하다. 신제품에 대한 철저한 시험과 정기적인 설비 관리가 요구되며 특히, 경년특성을 검증할 수 있는 효율적인 방법의 제시와 함께 개폐기의 절연열화 사고의 예측 및 대비를 위한 절연 진단 시스템의 개발이 필요하다.

참고 문헌

- (1) “배전보호협조”, 한국전력공사 중앙교육원, 1997
- (2) “배전기기 통계자료. 2003.01”, 한국전력공사
- (3) “고장분석 및 예방대책”, 한국전력공사 배전처, 2002년
- (4) J M Braun, L A Gonzalez and F Y Chu, “A model of moisture ingress and distribution in gas insulated switchgear”, Proceedings, CIGRE Symposium 05-87, New and Improved Materials for Electro-technology, Paper 400-04, Vienna, 1987
- (5) S W Rowe, “Dielectric strength of SF₆/air mixtures”, Proceedings, 5th ISH, No 13.09, Braunschweig, 1987
- (6) “IEEE Guide for Diagnostics and Failure Investigation of Power Circuit Breaker”, IEEE Std C 37.10 - 1995
- (7) “25.8kV 가스절연부하개폐기 고장분석보고서”, 한국전력공사 전력연구원, 2003-2004년

감사의 글

본 연구는 산업자원부 전력사업연구개발사업의 일환으로 이루어졌습니다.

* 용어설명

- (1) 취성 벽개 파괴(劈開破壞) : 균열은 변형에 의해 발생하는데, 금속의 연성파괴는 상당한 소성변형(塑性變形) 후에 발생하며, 취성파괴는 벽개면이라는 특정 결정면을 따라 진행되는 것이 보통이고 균열전파가 빠른 것이 특징임.
- (2) TGA(Thermal Gravimetric Analysis) : 열 질량 분석법으로 온도의 함수로서 질량의 변화를 연속적으로 측정하는 방법, 즉 물질을 대워서 분해온도에 따른 성분 조사