

# 23kV 개폐기류의 고장분석을 통한 성능향상 방안

(The performance Improvement of switches through analyzing fault on 23kV class switchgear)

김동명\* · 최선규 · 윤태상 · 정상봉

(Dong-Myung Kim · Sun-Kyu Choi · Tae-Sang Yoon · Sang-Bong Jung)

## Abstract

This paper describes the performance improvement of switchgear. G/S(Gas Switch) is a common and very important facility in distribution system. In this paper We analyze the cause of trouble with operating switches. Using the conclusion through the investigation We propose the countermeasure of a malfunction in switching equipment.

## 1. 서 론

최근의 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.

품질개선 방안이 시급한 분야는 배전 설비분야로서, 그중에도 차단기 및 개폐기는 전력계통에 있어서 부하와 직접 접속되어 차단·투입, 통전설비로 사용되므로 개폐장치의 고장은 산업설비의 제어불능, 정지를 의미한다. 또한, 배전계통에서 개폐장치 고장은 수용가의 광범위한 정전을 유발함과 동시에 전기품질 저하의 원인이 된다.

본 논문에서는 국내 배전계통에 사용되는 개폐장치 실태를 알아보고 또한 대표급인 25.8kV 가스절연 부하개폐기의 최근 고장원인의 분석 사례를 통해 가스 개폐기류 설비의 품질개선 방안을 제시하고자 한다.

## 2. 국내 배전급 개폐장치의 현황

### 2.1 운전 실태

1966년부터 전류 감지식 과전류 보호기로서 유압식 자동재폐로 차단기(Recloser)를 도입하여 사용되었으며, 그 후 전자식 제품의 도입과 함께 1980년 초 국산화에 성공하였다. 1995년에는 고장구간 자동검출개폐기의 운영으로 고장구간 축소가 가능케 되었으며 아울러 배전선로 자동화 운전을 추진하였다. 구간개폐기로는 기

중방식인 인터럽터(Interrupter)와 밀폐구조인 SF6가스절연개폐기를 설치하여 사용하고 있다. 국내 배전급 개폐장치의 사용조건은 다음과 같이 명시하고 있다.[1]

가. 주위온도 : -25 ~ 40℃

나. 표고 : 1,000 m이하

다. 습도 : 40℃에서는 80%이하, 20℃에서는 90%이하  
라. 지중용은 지하 맨홀 등에 설치하여 침수될 경우 침수깊이 3m 이내로 제한하고 있다.

### 2.2 운전 현황

2003년 1월 현재 국내 22.9kV-y 배전계통에 설치 운영되고 있는 차단기·개폐기는 보호기기 약 8만대, 지중선로용 개폐기 2만 여대로 총 104,353대이다. 개폐기의 대부분은 SF6가스절연방식인 Gas Switch와 지중개폐기(Pad. SW)이며 전체의 개폐장치의 87.2%를 점유하고 있다. 표 1과 표 2는 국내의 배전선로 보호장치 및 개폐기 설치현황을 나타내고 있다[2].

표 1 가공배전용 개폐장치 설치현황  
Table 1 The present state of switchgear installed in KEPCO

사용 전압	Inter-rupter	Gas Switch	Re-closer	Section-alizer	기타	계
6.6kV	0	73	0	0	173	246
22.9kV	4,025	68,421	4,786	609	3,411	81,252
22.0kV	157	5	0	0	3	165
대수	4,182	68,499	4,786	609	3,587	81,663
점유율 (%)	5.1	83.9	5.9	0.7	4.4	100

- 기타 : ASS, ALTS, FAS, A/S, O/S

표 2 지중배전용 개폐장치 설치현황  
Table 2 The present state of pad mounted switch installed in KEPC

사용 전압	지중개폐기				지중보호기기		계
	지상	지하	고객	계	ALTS	차단기	
6.6kV	117	24	8	149	2	0	151
22.9kV	21,089	284	778	22,151	45	81	22,277
22.0kV	32	8	219	259	3	0	262
대수	21,238	316	1,005	22,559	50	81	22,690
점유율 (%)	93.6	1.4	4.4	-	0.2	0.4	100

\* ALTS : Auto Load Transfer Switch(자동부하 절환 개폐기)

### 2.3. 가스절연 부하 개폐기(Gas Insulated Load Break Switch) 규격

배전용 개폐기의 약 87%를 점유하고 있는 SF<sub>6</sub> 가스절연부하개폐기의 규격의 일례를 표 3에 표기하며 다음의 특성이 있다.

- ① 삼상 일괄의 단일 탱크형으로 본체, 취부금구, 제어함으로 구성
- ② 절연 및 소화매체로 SF<sub>6</sub> 가스가 봉입되어 있음
- ③ 소형, 경량화된 것으로 편출 가공장주에 취부용이(행거형)
- ④ 지중배전선로용으로 보도에 설치되는 지상설치형

표 3 가스개폐기의 규격 일례  
Table 3 For example of the standard for Gas Switch

Model No.	JK-SGS		
정격전압	15kV	25.8kV	33kV
정격전류	400/630A		
정격주파수	60Hz		
정격 단시간전류 (1s, r.m.s.)	12.5/16kA		
정격 투입전류	32.5/40kA		
상용주파내전압	40kV	60kV	70kV
충격내전압	105kV BIL	125, 150kV BIL	170kV BIL
기계적 개폐강도	5,000 회		
부하개폐능력	200/400 회		
정격 가스압력	0.35kgf/cm <sup>2</sup> (at 20°C)		
시험적용 규격	IEC 60265-1, ANSI C 37.71		

## 3. 고장현황

### 3.1 국내 개폐기류의 고장 현황

표 4는 2001년도 국내 개폐기류의 고장을 원인별, 기기별로 나타내고 있다. 개폐기류 고장의 34%는 자연 열화에 의한 고장이며, 제작 불량에 의한 고장도 22%를 점유하고 있어 제조공정에 대한 품질 개선이 필요한 실

정이다[3]. 또한 가스절연 부하개폐기가 전체 개폐기류 고장의 53%를 점유하고 있어 고장감소를 위해서는 SF<sub>6</sub> 가스 절연상태의 진단·감시시스템 구축이 요구된다.

표 4 국내 개폐기류의 고장현황(2001년)  
Table 4 The statistical data of fault on switchgear

구분	자연 열화	외물 접촉	자연 현상	제작 불량	일반인 과실	기타	합계
I/S	1	7	1	0	1	1	11
COS	9	7	3	1	1	0	21
G/S	26	0	3	24	0	4	57
R/C	8	8	2	1	1	5	25
지중 개폐기	4	0	0	5	13	3	25
기타	0	0	0	0	0	4	4
합계	48	22	9	31	16	17	143
점유율 (%)	34	15	6	22	11	12	100

### 3.2 국외의 개폐기류 고장 사례

그림 1은 1978년 ~ 1992년간의 Switchgear 고장원인에 대하여 CIGRE에 발표된 자료로, 고장모드의 기계적 원인이 70%를 차지하며, 보조 및 제어회로의 전기적 원인이 19%, 주 회로의 전기적 원인이 11%로 보고 되고 있다[4-6].

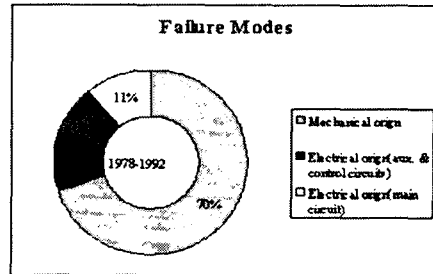


그림 1 Switchgear의 고장모드 분석 예  
Fig. 1 The fault analysis of Switchgear(CIGRE)

CIGRE에 보고된 고장원인 비율은 다음과 같다[6].

- 1) Operating mechanism : 43 - 44 %
  - 압축 컴프레서, 펌프 등 : 13.6 - 18.7 %
  - 에너지 저장 : 7.2 - 7.6 %
  - 제어 요소 : 9.3 - 11.6 %
  - Actuator, 제동 장치 : 5.1 - 8.9 %
  - 기계적 동력 전달부 : 1.4 - 3.8 %
- 2) Electrical control & aux. circuits : 20 - 29 %
  - 트립/폐로 회로 : 1.5 - 10 %
  - 보조 스위치 : 2.1 - 7.4 %

- Contactor, heater : 5.4 - 7.6 %
- 가스 밀도 모니터 : 4.0 - 10.7 %
- 3) High-voltage components : 21 - 31 %
  - 차단부 : 9.4 - 14 %
  - 보조 차단부, 저항 : 0.6 - 1.3 %
  - 대지간 절연 : 5.7 - 20.9 %
- 4) 기타 원인 : 5.4 - 6.8 %

## 4. 국내 가스개폐기의 고장분석 사례

### 4.1 국내 중전기기의 주변 여건

제조업체의 영세성 및 기술자의 잦은 이직으로 전문인력 확보 곤란하고 납품가격 경쟁(저가 경쟁)으로 기자재 품질관리 비용, 능력 저하 및 제조공정의 주요 관심은 주로 검수시험항목으로 다음과 같은 문제점을 안고 있다.

- 개발 시제품과 양산품의 품질 동일성의 차이
- 기자재의 경년변화 특성 미 검증
- 사용 부품의 신뢰도 검증 곤란
- 예방진단·운영기준 미 제정 : 운전개폐기의 상태 점검 미흡
- 제조단가보다 공사단가 상승, 정전비용 증가

### 4.2 가스개폐기의 고장사례

최근 5년간(1999~2003년) 국내에서 발생한 25.8kV SF<sub>6</sub> 가스절연부하개폐기의 고장 유형은 다음과 같다.

- ① 조작부 : 오·부동작 (부식, Grease 고착, 장치 파손 등)
  - 옥외환경에 의한 부식, Grease의 과도한 도포로 장기간 미사용 후 경화, 응력의 불균형에 의한 Shaft 파손
- ② 탱크의 누기 및 부식 : 가스압력 저하 및 조작 불량
  - 진공처리 불량, 유기절연재료에서 석출되는 수분량, 패킹 투과
- ③ 차단부 : 전극의 접촉불량, 정격을 초과하는 이상전압(TRV) 유입, 내부 가스 상태 불량
  - 개폐동작 이상, 점접 불량, 점접 발열, 절연성능 저하

#### 가. 조작불량 사례

그림 2는 외부의 환경에 의해 부식된 수동조작핸들이 조작·불능된 사례를 보여주고 있으며, 그림 3은 제조과정 중 가동전극에 Grease의 과도한 도포가 장기간 미사용후 경화되어 개방/투입 동작 불량원인이 된 사례를 보여주고 있다. 특히 고착상태가 심한 전극의 경우 그리스(grease)가 하우징에 비산한 흔적이 있는데 이것은 개방 시 전극에서 발생하는 아크에 의해 그리스가 비산

한 것으로 보이며 이러한 과정에서 그리스 자체가 변성 고착될 수도 있어 가동전극의 운동을 방해 한 것으로 분석되고 있다.

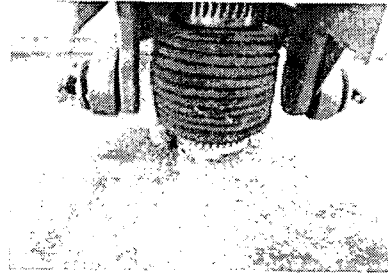


그림 2 조작핸들의 부식  
Fig. 2 An erode of handle

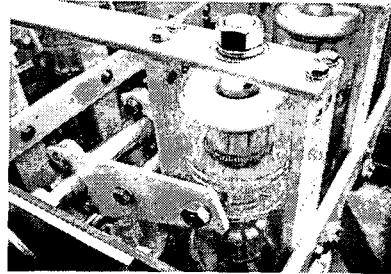


그림 3 개방상태 불량  
Fig. 3 Faulty in open state

그리스의 물성시험을 KS M 2032 규격에 따라 시험한 결과, 표 5와 같이 온도변화에 의해 주도(稠度)가 변함을 알 수 있으며, 따라서 그리스 of 과도한 도포는 조작상태에 더 큰 영향을 준 것으로 사료된다[전력연구원, 2003].

표 5 그리스의 물성시험  
Table 5 A properties of matter test for Grease

시험 항목	시험치(25℃, 60회 혼화)	특성
혼화	20℃	301
주도	-25℃	189

그림 4는 구동 Shaft와 전극 Shaft의 가동범위가 일치하지 않음으로서 상시 비틀림 응력이 가해지고, 조작 시에는 더 큰 충격이 작용하여 취약개소인 연결부위가 손상된 사례를 보여주고 있으며 파괴단면을 전자현미경(SEM)으로 관찰한 결과(그림 5), 벽개파괴(劈開破壞)<sup>1)</sup>에 의해 파손된 것으로 분석되었다.

1) 취성 벽개파괴(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 빠르다.

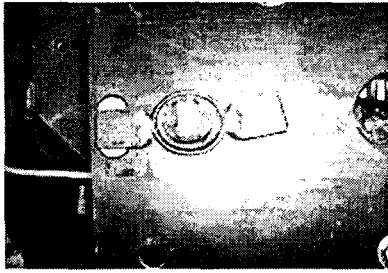


그림 4 구동 Shaft의 파손  
Fig. 4 A breakage of moving shaft

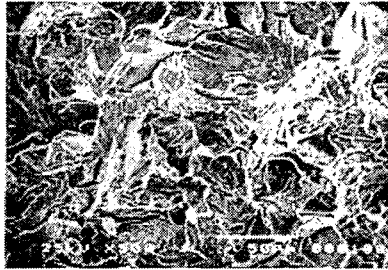


그림 5 파괴 단면(×500)  
Fig. 5 a sectioned drawing of breakage

#### 나. 수분에 의한 절연열화

그림 6은 내부 수분관리 불량으로 인한 예폭시 절연체 표면의 트래킹 발생을 보여준다. 표면 결함은 가스 분해물질이나 도전성 파티클, 가스내 수분 등에 의한 부분방전으로 인해 절연체 표면이 고유 성능을 잃게 되는 경우이다. Flashover에 의한 트래킹(Tracking) 결함도 표면 결함의 일종이다. 가스의 절연성을 떨어뜨리는 가장 흔한 요인이 수분이다. 수분이 기체상태로 있을 때는 별 문제가 없으나 과도한 수분이 존재할 경우 갑작스런 온도변화에 의해 응축현상이 생긴다. 응축된 수분은 불순물과 조합하여 절연체 표면에 도전성을 증가시키고, 열화특성을 악화시키며, 직접적으로 절연사고를 일으키기도 한다. 또한 예폭시는 수분을 흡수하여 저장하는 역할을 담당한다[7].

어느 일정 온도에서 가스내 수분과 예폭시 내 수분이 평형을 이루고 있었다면, 온도변화가 있을 경우 수분은 어느 한 방향으로 이동하게 되며 따라서 계절마다 가스내 수분함량이 다르게 나타나는 것은 이러한 이유 때문이다. 이 경우에도 온도변화가 급속히 생기면 수분함량이 과도적으로 높아져 수분응축을 가져와 사고요인으로 작용한다. 그 외에, 가스내에 공기가 다소 혼합된다거나 가스 분해물질이 소량 존재한다 하더라도 가스 자체의 절연내력을 떨어뜨리는 경우는 거의 없다[8].

절연물에 누설전류가 흐를 경우 발생하는 도전성 가스는 내부 공간의 절연저하를 가져온다. 그림 7은 예폭시 절연물에 주수섭락 모의 시험한 결과를 보여 주고

있다. 절연체의 표면이 건조할 경우는 우수한 절연상태를 유지하지만 표면에 수분이 부착한 경우 파괴전압이 급속하게 저하되어 절연파괴가 발생할 가능성이 있다 [전력연구원, 2003].

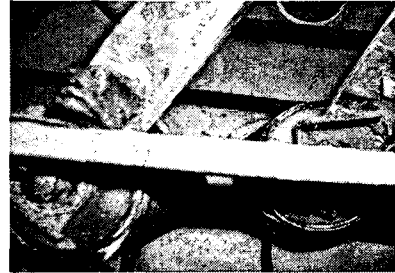


그림 6 절연암의 트래킹  
Fig. 6 A tracking on insulation arm



그림 7 주수 섭락시험(26kV)  
Fig. 7 Wet and flashover test

#### 다. 부속품의 열화

그림 8은 차단부의 가스조절판(Valve Seal)이 이탈 또는 손상되어 개방 동작 시 가스의 소호성능에 영향을 준 사례를 나타내며, 그림 9는 퍼퍼 하우스(Puffer Housing)의 표면균열을 저배율 입체현미경으로 관찰한 것으로, 불량 제조된 Housing(사출성형)의 섬유질이 불순물로 작용하여 운전 중 절연 파괴된 경우이다.

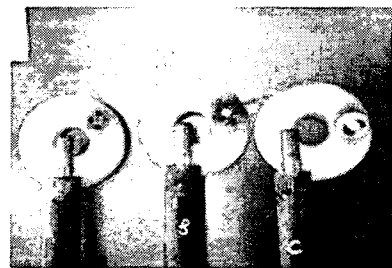


그림 8 가스조절판의 이탈  
Fig. 8 The breaking away of gas adjustment

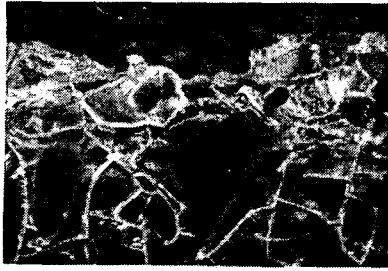


그림 9 Housing 표면(×12.8)  
Fig. 9 Surface of housing

#### 라. 접점의 용손

접점불량에 의해 증가된 접촉저항은 발열현상과 함께 전극이 용손(溶損)되므로 본래의 기능을 잃어버리게 된다.

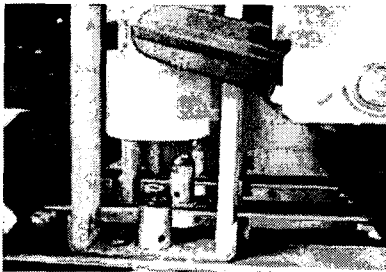


그림 10 접점 용손  
Fig. 10 Melting of contactor



그림 11 전극의 소손  
Fig. 11 Melting of an electrode

그림 10은 접촉 불량에 의해 접점이 용손된 사례를 나타내고 있으며 그림 11은 Puffer Housing 내부에서 가스의 절연불량에 의한 단락으로 전극이 용융된 것을 보여주고 있다.

특히 전극에서의 아크방전 시 중심온도는 접점의 용융점(텅스텐합금, 용융점 3,410℃)을 초과하여 접점 부위를 열적으로 손상시키며, 최종적으로 단락고장을 발생시킨다.

#### 마. 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 12는 경년열화에 의한 O-ring의 표면 crack을 보여주고 있다.

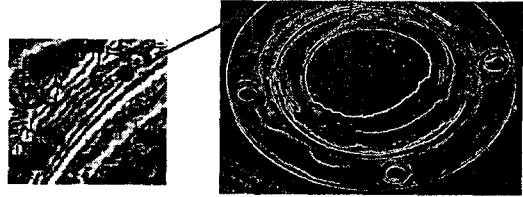


그림 12 O-ring의 표면 crack  
Fig. 12 A surface crack on O-ring

### 5. 결 론

본 고에서는 국내의 23kV 개폐기류의 운용에 있어서 발생되었던 고장 사례를 토대로 여러 가지 고장원인을 분석하였다. 본문에서 언급하지는 않았지만 가스절연개폐기 고장원인의 많은 부분을 차지하는 절연가스에 대한 관리는 현재로서는 단순히 본체내부의 가스압력만을 확인할 뿐 장기 사용에 대한 성능평가 및 예방진단이 수행되고 있지 않는 실정이다. 국내의 제조 현장 여건을 고려해 볼 때 향후 개폐기의 장기신뢰성 확보를 위해서는 제조 품질 개선은 물론 경년특성을 검증할 수 있는 효율적인 방법의 제시와 함께 다양한 운전기법 개발이 필요하다.

#### 참 고 문 헌

- (1) “배전보호협조”, 한국전력공사 중앙교육원, 1997.
- (2) “배전기기 통계자료. 2003.01”, 한국전력공사.
- (3) “고장분석 및 예방대책”, 한국전력공사 배전처, 2002.
- (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.
- (7) 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 Electrotechnology, Paper 400-04, Vienna, 1987.
- (8) S W Rowe, “Dielectric strength of SF6/air mixtures”, Proceedings, 5th ISH, No 13.09, Braunschweig, 1987.