

## 배전용 가스개폐기 신뢰성 평가 연구

권태호\*, 김동명\*, 이도훈\*\*  
한국전력공사\*, LS산전(주)\*\*

### Reliability Assessment of Medium Voltage Gas Insulated Switchgear

Tae-Ho Kwon\*, Dong-Myung Kim\*, Do-Hoon Lee\*\*  
Korea Power Electric Corporation\*, LS Industrial Systems CO., Ltd\*\*

**Abstract** - 본 논문은 한전에서 사용되는 25.8kV 가스 절연 부하개폐기(이하 개폐기)에 대해 장기과동전시험, 부하전류 개폐 및 점접마모시험, 가스 기밀재 가속열화시험을 통해 신뢰성을 평가하였다. 국내 개폐기의 신뢰성 및 수명에 대한 척도를 평가한 결과, 모든 시료가 B<sub>10</sub> 수명 20년 이상을 보증할 수 있는 것으로 나타났다.

#### 1. 서 론

개폐기를 포함한 가스절연기기의 신뢰성 평가에 있어서 국제적인 규격은 현재까지는 없다. 다만 일본 전기협동연구, 일본 전기학회기술보고 등의 문헌에서 신뢰성 향상을 위하여 실시하고 있는 평가 방법이 보고되고 있다. 이러한 시험을 실시하는데 있어서 개폐기의 크기가 크고, 시험에 소요되는 시간과 비용이 과다하므로 주로 구성 부품에 대한 평가를 위주로 실시하고 있다. 국내에서도 위 문헌을 토대로 가스절연 부하개폐기의 신뢰성 평가 기준(RS C 0031)이 제정 되었으며, 본 연구에서는 이 규격을 참조하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 시료

신뢰성 평가시험은 한전 구매시방서의 시험기준을 충족한 개폐기와 동일한 구조를 가진 피시험품으로 실시하였으며, 시험에 사용된 시료는 모집단(전국에 설치되어 있는 개폐기 약 127,940대, 2008년 10월 기준)을 대표할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 국내 개폐기 점유율을 조사하여 지중형은 A사와 B사를 가공형은 C사와 D사를 시험 표본으로 선정하였다. 표본으로 선정된 이유는 4개사의 국내 개폐기 점유율은 약40%에 이르며(지중형 약 18%, 가공형 약 22%), 지중형과 가공형의 점유율이상위 또는 중간을 차지하는 업체를 선정하였다.

한 수명평가시험과 신뢰도 평가시험을 토대로 교체기 교체기준을 설정하게 된다.

신뢰성(수명)시험에 사용된 개폐기 시료는 4개 제조사의 총 8대(지중형 2개 제조사 총 4대, 가공형 2개 제조사 총 4대)이며, 위에서 설명한 바와 같이 모집단을 대표할 수 있도록 샘플링(sampling)하였다. 또한 기밀성능에 가장 영향을 많이 미치는 부품으로 O-ring 가속열화 시험에는 4개 제조사 15종에 대해 총 150개의 부품에 대해 시험을 진행하였다. 부하개폐 시험에 사용된 시료는 사선형 타입 1대, 3-P 타입 1대에 대한 시험결과이며, 시험에 사용된 시료는 모두 신제품이다.

##### 2.1 장기과동전시험

개폐기에 사용되는 절연물의 신뢰성을 평가하기 위한 시험으로 전압 가속수명평가는 <식 2>에 따라 결정되는 과전압을 상시 인가해야 하며, 이 전압은 개폐기 특성에 따라 결정되어야 한다. 너무 높게 결정된 경우는 절연 한도를 초과할 수 있고, 너무 낮게 결정된 경우는 과도한 장시간이 소요된다. 이러한 배경으로 일본 전기학회기술보고 등에서는 전압 배수  $\alpha=1.2\sim 1.5$ 의 범위에서 과전시험을 실시하도록 규정하고 있으며, 가속 계수는 n의 값에 따라 결정되며, 개폐기에 사용되는 절연물의 경우  $n=14\sim 16$ 의 범위로, 본 시험에서는 14를 채택하였다.

절연물 상시전압을 인가시켜 놓으면 시간의 경과에 따라 재료의 전기적 특성이 저하된다. 이러한 전기적 수명특성은 <식 7.5>의 관계가 일반적으로 통용되고 있다.

$$V^n L = C \quad \text{<식 1>}$$

V : 인가 전압, L : 수명, C : 상수

그리고 개폐기 내부의 조차로드를 포함한 절연물의 수명은 많은 실험 결과에 따라 <식 2>의 실험식이 인정되고 있다.

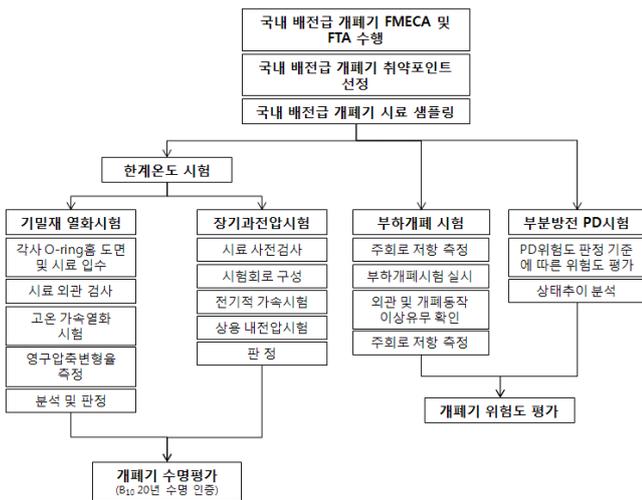
$$\alpha = \frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{-\frac{1}{n}} \quad \text{<식 2>}$$

V<sub>1</sub> : 시험 전압, V<sub>2</sub> : 운전 전압, T<sub>1</sub> : 시험 기간, T<sub>2</sub> : 기대 수명

개폐기에 대한 장기과동전시험 결과를 <표 1>에 나타내었다.

<표 1> 개폐기 장기과동전시험 결과

시험방법 및 기준	시료	시험 전압 (kV)	시험 시간	평가 결과	
RS C 0031(2003)에 따라서 60Hz의 상용주파 내전압을 상 전압에 대한 전압배수 1.4를 적용하여 인가하였을 때 시험중 방전이 없어야 하고, 시험 후 개폐기의 성능평가 시험에 규정된 상용주파내전압의 80%를 3상 일괄 대시간에 인가시 방전이 없어야 하며, 개폐기 해체 후 육안검사 결과 이상이 없을 것.	지중형	A	22.34	이상 없음	
		B	50일		
	가공형	C	20.9		130일
		D			
기준부합여부	부합함				



<그림 1> 개폐기 수명평가 및 신뢰도 평가 시험 흐름도

<그림 1>은 개폐기 수명평가 및 신뢰도(위험도) 평가 시험에 대한 전체 흐름도이다. 먼저 개폐기 고장/교체 이력데이터에 대한 통계적 분석과 개폐기 FMECA 및 FTA를 수행하여 개폐기에 대한 주요 고장모드를 선정 후 취약 부품을 선정한다. 이후, 선정된 부품에 대한 가속수명시험을 통해 수명을 평가하고 우발고장모드를 갖는 부품 및 고장모드에 대해서는 고장으로 인한 영향 및 치명도 분석을 통하여 개폐기 신뢰도 평가기준을 설정한다. 이와 같은 개폐기에 대한 주요 취약 부품에 대

배전급 개폐기중 지중형 개폐기 2개 제조사 및 가공형 개폐기 2개 제조사를 샘플링하여 장기과동전시험을 수행한 결과 모두 전압배수에 의한 시험시간 내 파괴방전이 발생하지 않았으며, 시험 후 개폐기는 성능평가시험에 규정된 80 % 상용주파 내전압 시험을 실시하여 이상이 없

었다. 본 시험은 개폐기내 절연물에 대한 전기적 신뢰성을 평가하는 항목으로 가스절연개폐기 신뢰성평가 기준(RS C 0031)에 의해 시험 판정 기준에 부합할 시 개폐기의 전기적 수명특성 B<sub>10</sub> 20년을 만족한다 할 수 있다.



<그림 2> 장기과동전시험(지중형)

**2.2 부하전류 개폐시험**

1 kV~52 kV 미만 정격전압과 16% Hz에서 60 Hz 이하에 대한 옥내 및 옥외 설치를 위해 설계된 3상 교류 개폐기 및 개폐 단로기의 부하전류 개폐시험은 규격 IEC 60265-1을 따라 수행하였다. E1, E2 및 E3 개폐기의 3상 시험에 대한 동작횟수, 시험전압, 시험전류는 <표 7.16>를 따르며, 시험이 진행되는 동안 개폐기의 재조정 없이 시험하여야 한다. 여기서, U<sub>r</sub>은 개폐기의 정격전압, I<sub>1</sub>은 정격 유효 부하 차단 전류이다.

<표 2> 개폐기의 시험 책무

시험 책무	시험 전압	시험 전류	개폐 횟수		
			E1	E2	E3
유효 부하 전류	U <sub>r</sub>	I <sub>1</sub>	10	30	100
		0.05I <sub>1</sub>	20	20	20

**<표 7.17> 4선형 개폐기 부하전류 개폐시험 조건**

적용규격		IEC 60265-1
동작책무		CO 100회
회로 조건	인가전압	상전압 평균: 14.9 kV+10 % , 개별 상전압 편차: 상전압평균의 10 % 이하
	회복전압	인가전압의 0 ~ +10 %
	시험전류	상전류 평균: 600 A+10~0%
	역률	전원측
부하측		평균: 0.7 ±5 % 이하, R, L 병렬 구성
가스 압력		최저보증압력 1.0psi(gague)

국내 A사의 사선형 개폐기에 대하여 IEC 60261-1에 따라 부하전류 개폐시험을 수행하였으며, 100회의 부하전류 개폐시험 완료 후 외관 및 개폐동작 수행에 이상이 없음을 확인하였다.

**2.3 가스 기밀재 가속열화시험**

개폐기는 외함이 모두 용접된 완전 밀폐형으로서 수명기간 동안에는 유지 보수를 실시하지 않는 구조로서, 열화에 의한 누설은 부싱, SF<sub>6</sub> 스 주입구, 각종 계기, 조작 로드 등의 기밀 유지를 위하여 사용하는 오링의 열화 특성에 따라 기밀이 유지된다. 이러한 기밀재의 재료로는 클로로플로로폴렌(네오플렌 고무), 니트릴 고무 또는 에틸렌 프로필렌 고무 등이 이용되고 있으며, 기밀 성능은 이들 고무의 압축 복원력에 따라 유지된다. 이 압축 복원력이 한계치에 도달하는 경우, 즉, 압축에 따른 영구압축 변형율이 일정치를 초과하면 기밀재의 기밀 효과를 상실하게 되며, 이러한 압축 복원력은 경년에 따른 열적 요인에 의해 지배된다.

일본 전기협동연구보고서와 일본 전기학회 기술보고(Ⅱ부) 등의 문헌을 참조하면 영구압축 변형율이 80 % 까지는 SF<sub>6</sub> 가스의 기밀에 대한 신뢰성이 유지되는 것으로 보고되어 있다. <그림 3>는 기밀재의 사용년도에 따른 영구압축 변형율을 보여준다.

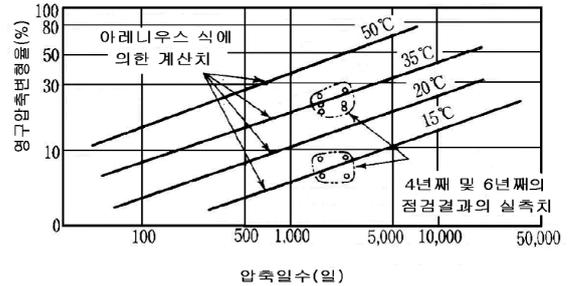
$$P_p = \frac{\delta'}{\delta} \times 100 \quad <식 3>$$

P<sub>p</sub> : 영구압축 변형률 (%), δ : 변형치, δ' : 영구압축 변형치(d<sub>1</sub> - d<sub>2</sub>)

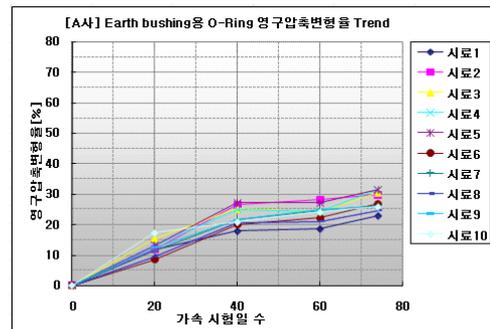
$$\log t_L = -A + \frac{E}{2.303R} \left(\frac{1}{T}\right) \quad <식 4>$$

t<sub>L</sub> : 수명에 도달하는 기간, R : 기체 정수

- A : 정수(재료에 따라 결정되는 정수)
- E : 활성화 에너지(시료에 따라 결정되는 정수)
- T : 기밀재의 절대 온도(K)



<그림 3> 기밀재의 사용연수에 따른 영구압축 변형율



<그림 4> A사 접지부싱용 O-ring의 영구압축 변형율 Trend

배전용 개폐기를 대표할 수 있는 지상형 제조사 2개사 및 가공형 제조사 2개사의 기밀재(O-ring)에 대한 가속열화수명시험을 수행한 결과 모든 시료가 RS C 0031에 의한 기준을 만족하였다. 즉, 고압 가스절연 부하개폐기 신뢰성 평가기준(RS C 0031)에 의해 국내 배전용 개폐기의 기밀재(O-ring)은 B<sub>10</sub> 수명이 약 52(51.7)년 이상임을 보증할 수 있으며, 이는 국내 배전용 개폐기의 B<sub>10</sub> 수명 20년을 보증하기에 충분하다고 할 수 있다.

**3. 결 론**

국내 배전계통에서 사용중인 배전용 가스절연 부하개폐기의 신뢰성을 평가하기 위해 장기과동전 시험, 부하전류 개폐시험, 가스기밀재 가속열화시험을 수행하였으며 각 시험에 대한 결과는 다음과 같다.

개폐기에 사용되는 절연물의 신뢰성을 평가하기 위하여 RS C 0031 규격에 따라 장기과동전 시험을 수행하였다. 국내 개폐기 업체중 가공형 및 지상형 개폐기 각각 2개 제조사를 선정하여, 각 업체별 2대씩 총 8대에 대하여 시험을 실시한 결과 모든 개폐기가 RS C 0031 규격을 만족함으로써, 국내 배전용 개폐기의 B<sub>10</sub> 수명이 20년 이상임을 확인하였다.

한전 계통에 사용되는 배전용 개폐기는 E3급으로서, 100% 부하전류 조건에서 100회 이상까지 개폐가 가능함을 부하전류 개폐 시험을 통하여 확인할 수 있다. 이는 배전계통에 설치 운영중인 거의 모든 개폐기가 무부하 동작을 포함하여 100회를 초과하는 경우가 없으므로 개폐동작이 규정치 이내 일 때는 수명에 미치는 영향이 크지 않을 것으로 판단된다.

배전용 개폐기의 가스의 기밀성능에 가장 영향을 많이 미치는 취약 부품으로 선정된 O-ring에 대해 가속열화시험을 수행한 결과 모든 시료가 영구압축 변형률 80 % 이내로 B<sub>10</sub> 수명이 52년 이상을 보증할 수 있는 것으로 나타났다.

**[참 고 문 헌]**

[1] “개폐기 건전성 평가 및 진단기준 제정에 관한 연구”, 한국전력공사, 2007  
 [2] “배전설비 고장분석 및 예방대책”, 한국전력공사, 2005.  
 [3] 信頼性管理便覧委員会編, “品質保證のための信頼性管理便覧”, 日本規格協會, 1985.  
 [4] ガス絶縁開閉装置の規格改訂と關聯規格との整合性調査専門委員會編, “ガス絶縁開閉装置の適用ガイド”, 電氣學會(日本), 2006.