

배전선로용 가스절연부하개폐기의 신뢰성 향상책

박승재*, 허종철*, 신영준*, 강영식*, 교회석**
*한국전기연구원, **경남대학교

Reliability for SF6 gas load break switch of distribution system

Park Seung-Jae*, Heo Jong-Chul*, Shin Young-June*, Kang Young-Sik*, Koh Heui-Seog**
*Korea Electrotechnology Research Institute, **Kyungnam University

Abstract - SF₆ gas has been increasingly used as the insulating and arc-suppressing medium in switchgears which are used as the protection devices of power system. Nowadays, most of power companies adopted the SF₆ gas-type load break switch for increasing the reliability of distribution network by its superior durability against external environmental condition, in substitution for air-type and oil-type switches. But, it is important to establish the general estimation process for the testing and estimation for long-term reliability. Accordingly, this paper presents the reliability testing method for SF₆ gas load break switch which is based on the analysis of the failure mode and the statistics.

차단기와 가장 큰 차이점은 고장전류 차단 성능이 요구되지 않는다는 점이다. 이러한 개폐기의 성능은 국제규격으로 통용되고 있는 IEC 60265-1(1998)에 따라 표-1과 같이 규정되어 있으며, 국내의 최대 사용 기관인 한국전력공사도 이 규격을 근간으로 사용하고 있다. 표-1에서 알 수 있는 바와 같이 개폐기에 요구되는 기본 성능은 크게 다음과 같이 구분된다.

- (1)절연성능
- (2)전류통전성능
- (3)개폐내구성능
- (4) 전류개폐 및 고장전류 투입성능
- (5)기밀성능

이 중 기밀성능은 최근 기기의 소형화와 절연 유지를 위하여 SF₆ 가스의 사용이 일반화됨에 따라 추가되는 항목이다.

표 1. 개폐기의 시험평가 항목

1. 서 론

배전선로에서 선로의 구분 및 절체와 안정적인 전력 공급을 위하여 사용되는 개폐기는 1980대까지는 대기중에서 부하를 개폐하는 Interrupter Switch가 주로 사용되었다. 그러나 이 후 금속용기 안에 개폐를 위한 소호부를 설치하고 내부 절연과 소호력 향상을 위하여 절연 및 소호 성능이 탁월한 SF₆ 가스를 주입한 가스절연 부하개폐기의 보급이 일반화되고 있다.

이러한 가스 절연 부하 개폐기(이하 "개폐기"라 함)는 금속 용기 안에 SF₆ 가스를 충전함으로써 기존의 유입 개폐기나 공기 개폐기에 비하여 습도, 염분 등 외부 환경에 대한 영향을 받지 않도록 한 개폐 장치로서, 개폐기의 외함 설계, 제작에 있어서 외부 인출을 위한 부싱, 가스 충전용을 위한 주입구, 동작을 위한 조작 장치에 대해서 가스 기밀 용 오링을 이용하고 그 외 부분은 모두 용접하여 가스 기밀을 유지하고 있다. 그리고 개폐기는 수명기간동안 유지 보수를 실시하지 않는 설계 방식으로서 수명을 평가하기 위한 방법이 확립될 필요성이 있다.

또한 국내에서도 개폐기가 본격적으로 보급되기 시작한 지 20년 정도 지나고 있으며, 이 시점에서 개폐기의 수명 과 고장 원인 파악을 통하여 안정적인 계통 유지를 위한 개폐기의 신뢰성 평가 방법이 필요한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 20년 정도의 장기간 사용에 따른 개폐기의 신뢰성 향상을 위하여 필요한 평가방법에 대하여 소개하고자 한다. 이와 아울러 개폐기의 열화 메카니즘 분석과 고장 원인 분석을 통하여, 신뢰성 평가를 위한 통계 분석과 그 향상책에 대하여 논하고자 한다.

2. 본 론

2.1 개폐기의 기본 성능 평가

개폐기는 전력계통에서 무부하 상태의 선로 개폐와 부하 상태의 선로 개폐뿐만 아니라 고장 선로의 투입 기능을 가진 기기로서, 고장 선로 보호를 위하여 사용하는

항목	시험항목	목적
절연	상용주파내전압시험	교류 전압에 대한 절연성능 검증
	충격내전압시험	낙뢰등 서지에 대한 절연성능 검증
	보조 및 제어회로 내전압시험	제어회로의 절연성능 검증
	인공오손시험	오손 상태의 절연 유지성능 검증
	부분방전시험	장기 사용에 대한 열화성능 검증
전류통전	온도상승시험	정격 부하상태의 전류에 대한 연속 통전 유지성능
	단시간전류시험	고장전류에 대한 단시간(약 1초)동안의 전류통전가능
개폐내구성	M1급 내구성시험	1000회 개폐성능으로서 일반용 개폐기에 적용
	M2급 내구성시험	5000회의 개폐내구성으로서 다빈도 개폐기에 적용
전류개폐 및 고장전류 투입	부하개폐시험	정격까지의 부하전류 개폐성능
	지상전류개폐시험	
	진상전류개폐시험	
가스기밀 유지	단락 투입시험	고장전류에 대한 투입성능
	기밀시험	SF6 가스기밀 유지 성능 검증

2.2 신뢰성 향상을 위한 평가

가스 절연을 사용하는 전력기기의 신뢰성 향상을 위해서는 사용 중 수집된 고장에 대한 조사 자료가 필수적이다. 개폐기에 있어서 소호부와 절연물은 무부하 방식으로 설계하고 있으며, 고장 양상도 개폐기 내부의 절연과 90% 이상이며 가장 치명적인 것으로 보고되고 있다. 이러한 절연과파괴 원인으로는 (1)절연 유지를 위해 사용하는 SF₆ 가스 기밀 유지를 위한 기밀재(O-ring)의 열화, (2)사용 중 상시 과전 상태인 절연물의 열화로 인한 고장이다.

표-2와 표-3은 개폐기의 고장 형태와 그 평가 방법을

보여주고 있다. 가스 기밀 성능을 결정해주는 기밀재는 주위 온도에 의한 열화 특성을 가지고 있으며, 내부 절연물은 장기간 과전에 따른 전기적 수명이 주원인이다.

표2. 고장 파괴 모드 분석

Stresses	고장형태		기밀 성능	절연물	조작 장치	접점	SF ₆ 가스
	온도	기계적 스트레스					
기계적 스트레스	○		◇		◎		
전기적 스트레스	전압 요인			◎		◇	
	전류 요인					◎	◎

* 신뢰성에 관련된 중요도에 따라 표시 : ◎가장 중요 ○ 중요 ◇ 보통

표3. 고장 모드와 평가방법

고장형태	평가방법	내전압	개폐 특성	전류 개폐	고저온	영구압축 변형율	장기 과전
기밀성능		○		◇	◎	◎	
절연물		◎		○		◇	◎
조작장치			◎	○			
접점			○	◎			
SF ₆ 가스		◎		◎			

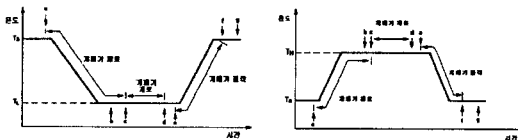
* 신뢰성에 관련된 중요도에 따라 표시 : ◎가장 중요 ○ 중요 ◇ 보통

2.2.1 외부 환경 변화에 대한 평가

일반적으로 SF₆ 가스의 누기율은 신제품의 기밀재를 사용해 주위 온도에 따라 달라지며, IEC 60694에서는 한계 온도에서 표-4와 같이 상온에서 정상적인 누기율의 최대 6배 높은 값을 허용하고 있으며, 다시 상온으로 복귀시에는 정상치로 복귀해야 한다. 이러한 온도 변화에 대한 누기율외에 한계 고저온 상태에서 정상적인 동작특성 유지 여부를 평가하는 것은 아주 중요한 요소이다. 이러한 가스기밀과 기계적 동작 특성을 검증하기 위한 평가방법은 그림-1과 같다.

표4. 온도에 따른 허용 누기율

온도 상승(°C)	일시적 누기율의 허용치
+40 및 +50	3F _P
상온	F _P
-5/-10/-15/-25/-40	3F _P
-50	6F _P



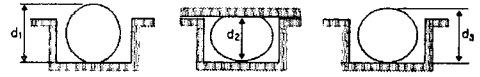
(a) 저온평가 (b) 고온평가
그림 1. 외부 환경에 대한 평가 방법

2.2.2 기밀재의 장기 열화 특성

2.2.2.1 가스 기밀재의 영구 압축 변형율

외함이 모두 용접된 완전 밀폐형인 개폐기의 SF₆ 가스 기밀 유지는 부상, 가스 주입구, 계기류, 조작 로드 등의 기밀을 위하여 사용하는 오링의 열화 특성에 의해 좌우된다. 이러한 기밀재는 클로로프로필렌(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 영구 압축 변형율이 일정치를 초과하면 기밀재의 기밀 효과를 상실하게 되며, 이러한 압축 복원력은 경년에 따른 열적 요인에 의해 지배된다. 이러한 개폐기의 기밀 유지는 영구 압축 변형율이 80%까지는 기밀이 유지된다.

그림-2는 영구 압축 변형율의 정의하고 있고, 그림-3은 기밀재의 사용 기간과 온도에 따른 열화 특성의 예를 보여주고 있으며, 식-(1)에 정의된 아레니우스 식과의 일치성도 우수하다.



(a) 사용 전(신품) (b) 사용 중 (c) 사용 후
여기서,

압축량 : $\delta = d_1 - d_2$
 영구 압축 변형치 : $\delta' = d_1 - d_3$

$$\text{압축율}(P) = \frac{\text{압축량}}{\text{기밀재 두께}} \times 100 = \frac{d_1 - d_2}{d_1} \times 100 (\%)$$

$$\text{영구압축 변형율}(P_p) = \frac{\text{압축영구 변형치}}{\text{압축량}} \times 100 = \frac{d_1 - d_3}{d_1 - d_2} \times 100 (\%)$$

그림2. 기밀재의 영구압축 변형율

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

여기서,

- t_L : 수명에 도달하는 기간
- R : 기체 정수
- A : 정수(재료에 따라 결정되는 정수)
- E : 활성화 에너지(시료에 따라 결정되는 정수)
- T : 기밀재의 절대 온도(°K)

2.2.2.2 열화 특성

기밀재의 열화 특성을 나타내는 영구압축 변형율은 그림-3에서 알 수 있는 바와 같이 주위 온도에 지배되는 아레니우스 식에 따르며, 식-(2)의 10°C 반감 법칙이 성립한다. 그리고, 이러한 열화 특성은 그림-2에 정의된 압축량에 따라 열화 속도가 달라지며, 대부분의 경우 압축율은 25-30% 정도를 유지하는 것이 일반적이다.

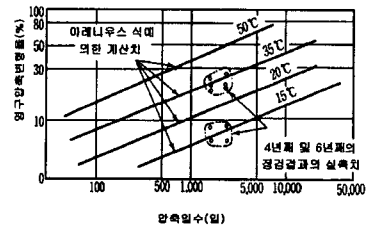


그림 3. 기밀재의 온도 열화 특성

$$L = L_0 \times 2^{\frac{T_0 - T}{10}} \quad (2)$$

여기서,

- L : T(°C)에서 수명
- L₀ : T₀(°C)에서 수명
- T : 상온(20°C)
- T₀ : 시험 온도(°C)

2.2.3 내부 절연물의 장기 열화 특성

2.2.3.1 장기 과전 특성

절연물에 상시 전압을 인가시켜 놓으면 시간의 경과에 따라 재료의 전기적 특성은 식-(3)에 따르며, 식-(4)의 전압 역누승 법칙에 따른 열화 특성을 나타낸다.

$$V^n L = C \quad (3)$$

- 여기서, V : 인가 전압
 L : 수명
 C : 상수

$$\alpha = \frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{-\frac{1}{n}} \quad (4)$$

여기서, V_1 : 시험 전압
 V_2 : 운전 전압
 T_1 : 시험 기간
 T_2 : 기대 수명

2.2.3.2 수명 평가 방법

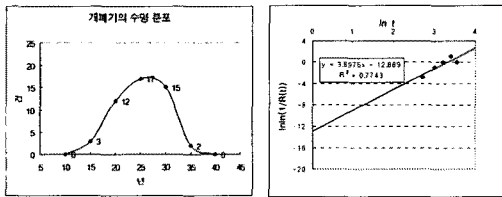
개폐기에 사용되는 절연물의 전압 가속 수명 평가는 식-(4)에 따라 결정되는 과전압을 상시 인가해야 하며, 이 전압의 결정은 개폐기의 특성에 따라 주의해야 한다. 너무 높게 결정할 경우는 절연 한도를 초과할 수 있고, 너무 낮게 결정할 경우는 과도한 장시간이 소요된다. 이러한 배경으로 전압 배수 $\alpha=1.2 \sim 1.5$ 의 범위에서 과전 시험을 실시하는 것이 일반적이다. 또한 식-(4)에서 α 와 n 의 값에 따라 시험기간(T_1)이 결정되며, 개폐기에 사용하는 절연물의 경우 $n=14 \sim 16$ 의 범위이다

2.2.4 신뢰성 평가 지수 산정

실제 수명 시험을 시행할 때 흔히 겪는 문제의 하나는 관측되는 고장 데이터의 수가 매우 적거나 무고장인 경우가 많다는 점이다. 이 경우에는 수명 분포로 널리 사용되는 와이블 분포(Weibull distribution)의 무고장 데이터 분석기법을 주로 사용한다. 중전기 제품은 대형, 고가의 장비가 많고 수명 시험에 소요되는 비용이 매우 높은 경우가 많으므로, 시험 비용과 시간의 제약으로 불가피하게 소수의 시료 (1 또는 2개)만으로 한정된 시간동안에 시험을 종료해야 하므로 와이블 분포에 의한 무고장 조건으로 인증 기준을 정하였다. 그리고 신뢰성 평가를 위한 요소는 2.2의 표-2와 표-3의 고장 분석에 기초하여 기밀재와 내부 절연물로 하였다.

2.2.4.1 형상 모수(β)의 결정

와이블 분포를 적용하기 위해서는 평가 요소에 대한 형상 모수(β)의 추정이 필수적이다. 이러한 형상 모수를 결정하기 위하여 기밀재로 사용하는 O-ring은 그동안 실시한 실험 결과 $\beta=1.1 \sim 1.7$ 의 범위이며, 보수적 접근 방법으로 1.1을 채택하였다. 그리고 내부 절연물은 그림-4의 고장 데이터 분석을 기초로 하여 3.9로 추정하였다.



(a) 수명 분포 (b) 형상 모수
 그림 4. 개폐기의 수명 분포와 형상 모수

2.2.4.2 무고장 데이터에 의한 Bq 수명의 평가

무고장 데이터에 의한 B_q 수명을 $100(1-\alpha)\%$ 신뢰 하한에서 평가하고자 하는 경우에는 식-(5)와 같이 T_0 동안 시험하여 이상이 없으면 합격으로 한다. 그리고 실제 시험 기간(T)은 T_0 를 가속 계수로 나누어 결정한다.

$$T_0 = t_0 \left[-\frac{\chi^2(2, \alpha)}{2n \ln(1-q)} \right]^{1/\beta} \quad (5)$$

여기서,
 n : 시료 수
 t_0 : B_q 수명의 일정값
 α : 유의 수준

2.2.4.3 신뢰성 평가를 위한 시험조건

개폐기의 신뢰성 평가를 위한 인증 조건은 와이블 분

포를 이용한 무고장 조건으로 하며, 이에 대한 평가 인증 조건은 다음과 같다.

- 보증 수명(B_{10}): 20년(7,300일)
- 신뢰 수준: 90%

위와 같은 조건에서 개폐기의 신뢰성을 평가하기 위한 기밀재와 O-ring의 요건은 표-4와 같다.

표 4. 신뢰성 평가조건

항목	인증 조건		열화 조건	시험기간(일)		가속계수
	B_{10}	신뢰수준		T_0	T	
기밀재	B_{10}	20년	시험온도 : 100°C	18,875	74	$2^8=256$
	신뢰수준	95%				
	형상모수	1.1				
	시료 수	10				
절연물	B_{10}	20년	과전계수 : 1.4	14,418	130	$1.4^{14}=111$
	신뢰수준	95%				
	형상모수	3.9				
	시료 수	2				

3. 결 론

SF_6 가스를 이용한 개폐기는 소형화와 높은 신뢰성으로 인하여 기중 개폐기나 유입형 개폐기를 급속하게 대체하여 사용이 확산되고 있으며, 국내에서도 한국전력공사의 경우에는 모두 이 가스절연 개폐기로 교체, 사용하고 있다. 그러나 이러한 개폐기는 소호부동이 모두 용접되어 있는 급속 외함안에 설치되어 있으므로 열화 정도나 이상 유무를 외부에서 육안으로 검사하는 것이 전혀 불가능하다. 따라서 장기간 과전 상태에 있는 가스절연 개폐기의 신뢰성 평가를 통하여 사용 수명에 대한 추정이 가능해질 것으로 사려된다. 또한 본 연구를 통하여 수립된 평가 방법은 전기부품 신뢰성 인증 규격으로 규격화되었으며, 향후 국내 개폐기에 실시되고 있는 성능 평가 시험과 병행하여 제품의 신뢰성 향상을 위한 평가를 통하여 전력 에너지의 안정적인 공급에 이바지할 것으로 사려된다.

[참 고 문 헌]

- [1] IEC 60265-1, "Switches for rated voltages above 1kV and less than 52kV", 1998
- [2] IEC 62271-100, "High-voltage switchgear and controlgear - Part 100 : High-voltage alternating-current circuit-breakers", 2001
- [3] IEC 60694, "Common specifications high-voltage switchgear and controlgear standards", 1996
- [4] PS 151-146, 147, 151-170, 180), "25.8kV 가스절연부하개폐기(가공용)", 2001
- [5] PS 151-143, 155, 151-165, 178 : "25.8kV 가스절연부하개폐기(지중용)", 2001
- [6] 일본 전기학회 기술보고(II부) 제355호, "변전설비의 환경열화시험"
- [7] 일본 전기학회 기술보고(II부) 제159호, "공장전기설비의 수명과 유지보수에 관한 앙케이트 조사보고"
- [8] 일본 전기학회 기술보고(II부) 제290호, "차단기의 신뢰성 및 진단기술"
- [9] 일본 전기협동연구 제33권 제4호, "SF₆ 가스절연기기보수기준집"
- [10] 일본 전기협동연구 44권 제2호, "가스절연기기의 신뢰성 향상책"
- [11] 사단법인 대한전기협회, "전기설비의 진단기술", 1994