

배전급 옥내용 진공차단기의 신뢰성평가

김민규, 김맹현, 신영준  
한국전기연구원

Reliability Assessment on the Indoor Vacuum Circuit Breaker  
Used in Distribution System

Min-Kyu Kim, Maeng-Hyun Kim and Young-June Shin  
KERI

**Abstract** - This paper represent a test method for the reliability assessment on the indoor vacuum circuit breakers used in the distribution system by an accelerated life test. In order to guarantee the lifetime in service of the vacuum circuit breaker, additional test methods are suggested. Multiple closing-opening operation test under no load condition as a mechanical endurance test and a check of the quality in the vacuum interrupter are adopted to assure the long-term reliability of the vacuum circuit breaker.

실제수명을 보증하기 위해 추가적인 시험방법을 제안하였다. 기계적 내구성을 평가하는 방법으로 무부하 조건에서 다수회 개폐동작시험을 실시하는 것과 진공차단부의 장기신뢰성을 보증하기 위한 진공도 검사방법을 제시하였다. 이러한 신뢰성평가는 실제 고장 데이터를 근거로 통계적인 방법에 의한 수명분포 등 신뢰성분석을 통한 진공차단기의 수명 예측등 차단기의 신뢰성평가를 위한 신뢰수준 90 %에서 B<sub>10</sub> 수명 20년을 보증하는 방법이다.

1. 서 론

진공차단기는 전력의 절체 및 정지 등을 계획적으로 수행하는 기능외에 전력계통에 고장이 발생시 신속히 자동적으로 전력 수송을 차단하기 위한 보호 장치인 전력용 차단기의 한 종류로서 진공을 소호매질로 이용하고 있다.

차단기를 이용하여 전력용 회로를 어떤 전극 간에서 닫고 열고 하는 경우, 그 전극 간에는 아크가 발생한다. 단, 이 상태에서 아직 전류는 계속 흐르고 있으며 차단하였다고 할 수 없다. 교류의 경우, 반 주기 마다 전류 영점이 나타나고, 그 때 전류의 흐르는 방향이 반전하고 있으며, 아크는 전류 영점시 마다 소멸하고 있는 것이다. 차단이란 이러한 전류 영점의 기회를 최대한 이용한 것이며, 또 차단을 더욱 완전하게 하기 위하여 아크를 강제적으로 늘리는 방법이나 소호실을 설치하여 신속히 아크를 냉각하는 방법으로써 아크 에너지를 효율적으로 소비(소호(消弧)라고 함)할 필요가 있다. 차단이 잘 되는가 안 되는가는 전극을 폐고 불이고 하여 전류 영점을 통과해서 일단 차단한 후, 다시 전류가 흐르지 않거나 아크 에너지를 효율적으로 빨리 소호시키는 것이 결정적인 수단이 되는데, 진공차단기는 진공 중에서의 확산 효과로 아크를 소호시키는 방법을 채용한 차단기이다.

진공차단기의 특성은 소형으로서 수명이 길고 차단기로서 기본적으로 필요한 고속도, 고신뢰 개폐의 가능 차단성능이 우수하다는 것이 가장 큰 장점이다. 이러한 진공차단기는 발전소, 변전소 등의 전력설비나 전철, 고속철도 등의 교통용이나 석유, 화학 공장 등의 산업분야에 널리 보급되어 이용되고 있는데, 전력계통의 고장 발생시 신속하게 차단을 하지 못하는 경우 전력의 안전한 공급에 막대한 장애를 가져오므로 진공차단기 대한 신뢰성을 확보하는 것은 매우 중요하다.

본 논문에서는 배전계통에 널리 이용되고 있는 옥내용 진공차단기의 신뢰성을 평가하기 위한 가속수명시험 방법에 대해서 서술한다. 또한 실 계통에서 진공차단기의

2. 본 론

2.1 진공차단기 열화

2.1.1 열화요인

진공차단기의 수명은 전류개폐에 의한 전기적 수명과 개폐에 의한 마모, 피로 등의 기계적 수명 외에 경연에 의한 절연물의 열화 등에 의해서 결정된다. 그림 1에 차단기의 열화특성 요인도를 나타낸다.

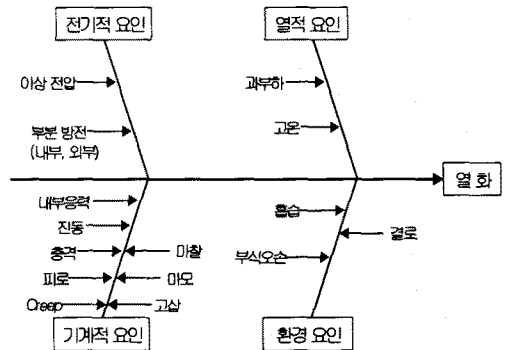


그림 1. 진공 차단기의 열화특성 요인도

1) 전기적요인

- (a) 절연물의 내부 부분방전열화 : 보이드, 이물, 크랙을 발생한 부분이 진전해서 treeing으로부터 파괴에 이르게 된다.
- (b) 절연물의 외부 부분방전열화 : 주위 환경 등에 의해서 열화가 발생하여 트래킹 또는 트리잉으로부터 파괴에 이르게 된다. 다시 말해서, 절연물의 오손, 흡습, 결로에 의해서 트래킹이 발생하여 지락에 이르게 된다.
- (c) 아크에 의한 전극마모 : 통전 상태의 회로를 차단하면 접촉자간에 아크가 발생한다. 접촉자의 표면은 아크 열에 의해서 부분적으로 증발하기 때문에 전류차단을 중복 행함으로써 소모가 일어나게 된다.

2) 열적요인

과부하, 과열, 온도상승에 의해서 전기절연재료의 열 분해가 일어나 보이드 박리에 의해 절연 열화한다.

3) 기계적요인

내부 응력, 진동, 충격, 피로 및 creep 등이 있는데, 주위의 온도 모두 밀접한 관계가 있고 특히 수지의 기계적 특성은 열변형 온도를 초과하면 저하한다.

4) 환경요인

특수한 환경을 제외하고는 직접적인 주 요인으로 되지 않지만, 다른 열화요인과 복합해서 절연열화를 일으킨다.

표 2. 고장 모드/메커니즘 및 시험 방법 Matrix

Test Methods Failure Modes/ Mechanisms	장기 과시 시험	다수 개 작 합	주회로 저 항 측 정	절연 저 항 측 정	진공도 검 사
진공도 저하	○	○	◇	○	◎
점점 마모	◇	○	◎	◇	◇
절연저항 저하	◎	◇	○	◎	○
접촉저항 증가	○	○	◎	○	◇
개폐시간 변화	○	◎	○	◇	◇
개폐속도 변화	◇	◎	○	◇	◇
누설전류 증대	◎	◇	○	○	○

◎가장 중요 ○중요 ◇보통

2.1.2 진공차단부의 열화특성

1) 점점마모 : 점점은 고진공 중에 있으므로 산화 등의 화학현상에 의한 열화는 없다. 또한 vat conductor 때문에 점점마모는 진류차단시의 아크에 의한 마모만을 생각하면 된다. 진공차단기는 아크전압이 지극히 낮고 또한 아크시간이 짧기 때문에 아크에너지는 다른 차단기에 비교해서 가장 작으므로 소모량도 적다.

2) 진공도 열화

- (a) 가스의 투과에 의한 진공도의 열화
- (b) 재료의 방출가스에 의한 진공도의 열화

2.2 고장 모드에 대한 분석

국내에는 진공차단기의 고장에 대한 자료가 정리되어 있지 않아서 일본 전기학회기술보고를 참조하여 고장자료를 분석한 결과를 그림 2에 나타내었다. 고장원인별로서는 제작불완전이 가장 많으며, 현상별로서는 개폐불량 등 기계적 조작의 불량에 절반을 차지하고 그 외 절연과 피, 통전이상, 기밀누설 등이 고장유형으로 나타나고 있다.

진공차단기의 고장모드와 메커니즘을 분석한 결과를 표 1에 나타내며 고장분석을 위한 시험방법을 정리하여 표 2에 정리하였다.

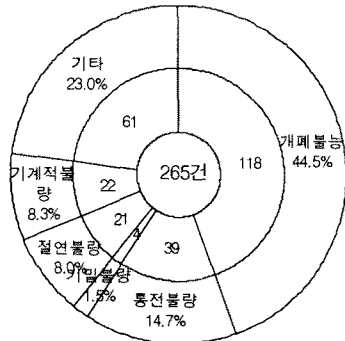


그림 2. 고장 유형별 분석

표 1. 고장 파괴모드 분석

Failure Modes/ Mechanisms Requirements (Stresses and Performance)	진공도 저하	점점 마모	절연 저하	접촉 저항 증가	개시 변화	누설 전류 증대
절연열화	○	-	○	-	-	○
환경열화	-	-	○	-	○	○
경년열화	○	-	○	-	○	○
개폐회수	△	○	△	○	○	○
차단전류	△	○	-	○	-	-

2.3 수명분포

진공차단기의 고장자료로부터 수명분포는 그림 3과 같다.

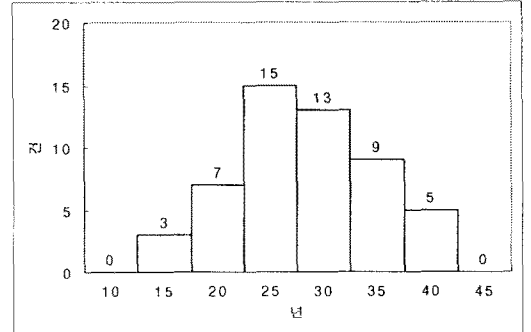


그림 3. 진공차단기의 수명

위 수명자료를 이용하여 신뢰성 척도를 추정하기 위하여 고장시간에 따른 신뢰도함수, 고장률 함수 등을 구하면 다음 표 3과 같다.

표 3. 진공차단기 수명자료 분석

t	n(t)	n(t)-n(t+Δt)	F(t)	R(t)	f(t)	λ(t)
10	52	3	0.00	1.00	0.01	0.01
15	49	7	0.06	0.94	0.03	0.03
20	42	15	0.19	0.81	0.06	0.07
25	27	13	0.48	0.52	0.05	0.10
30	14	9	0.73	0.27	0.03	0.13
35	5	5	0.90	0.10	0.02	0.2
40	0	0	1.00	0.00	0.00	

$n(t)$  = 시점 t까지 고장나지 않는 부품의 수(생존수)  
 $\widehat{R}(t)$  = 신뢰도 함수 (=  $1 - \widehat{F}(t)$ )  
 $\widehat{F}(t)$  = 고장밀도 함수,  $\lambda(t)$  = 고장률 함수

시험대상이 되는 n개 부품들의 고장시간들이 관찰되었다고 가정하고, 그 값들을  $t_1, t_2, \dots, t_n$  으로 나타내면, 이 경우 얻어진 자료들은 완전자료 (Complete data)가 되며 평균수명의 최우추정량(MLE)은 다음 식에서 얻어진다.

$$MTTF = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} = \frac{T_o}{n} = \frac{n \text{개 표본의 총 시험 시간}}{n \text{개 표본수 (총고장개수)}} = 25.7 \text{년}$$

진공차단기의 고장시간에 대한 확률밀도함수와 고장률 함수의 관계를 그래프로 나타내면 다음과 같다.

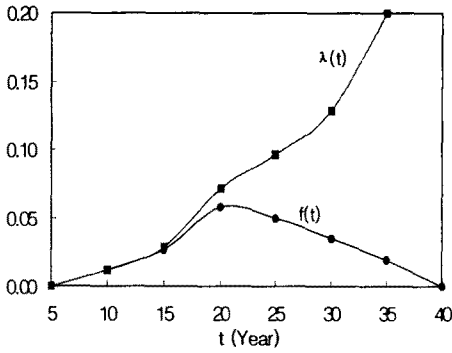


그림 4. 고장률 함수 및 확률밀도함수

진공차단기의 수명자료에서 고장률이 시간에 대해 증가하는 와이블 분포를 따른다고 볼 수 있다. 위의 결과를 근거로 와이블 수명분포에서 형상모수  $\beta$ 와 척도모수  $\theta$ 를 구해본다. 모수를 구하는 방법은 몇 가지가 있으나 여기에서는 2 개 이상의 고장 자료가 있는 경우에 이용할 수 있는 최소제곱법을 써서  $\beta$ 와  $\theta$ 의 추정 값을 구할 수 있다. 와이블 분포의 신뢰도 함수

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\theta}\right)^\beta\right] = \exp\left(-\frac{t^\beta}{\eta}\right)$$

로부터 양변에  $\ln \ln$  함수를 취하면

$$\ln \frac{1}{R(t)} = -\frac{t^\beta}{\eta}$$

$$\ln \ln \frac{1}{R(t)} = \beta \ln t - \ln \eta \quad (\because \eta = \theta^\beta)$$

를 얻는다. 다음 그림에서  $(\ln t_i, \ln \ln \frac{1}{R(t_i)})$ 의 점들이 일직선상에 놓이게 되는 선형회귀직선으로부터 최소제곱법을 이용하여 모수를 추정한다.

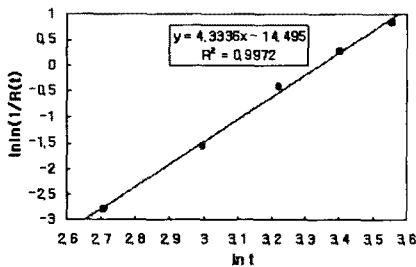


그림 5. 와이블 분포에서 모수추정

그림 5에서 최소제곱법을 이용한 직선의 기울기 4.33은 형상모수  $\beta$ 에 해당하며,  $\eta$ 의 추정치는  $\eta = \theta^\beta$ 이므로  $\hat{\eta}$ 와  $\hat{\theta}$ 는 다음과 같이 얻어진다.

$$\hat{\eta} = \exp(-14.495)$$

$$\hat{\theta} = \hat{\eta}^{1/\beta} = \exp\left(-\frac{\hat{\eta}}{\beta}\right) \quad (\text{단, } \hat{b} = \ln \hat{\eta})$$

$$\therefore \hat{\beta} = 4.33, \hat{\theta} = 28.43$$

상기의 수명자료를 분석하여 얻어진 형상모수의 값 4.33은 진공차단기 전반에 대해 조사한 자료로부터 구한 것으로 모집단의 범위가 광범위하다는 특수성이 있으므로, 배전급 옥내용 진공차단기에 대해서는 와이블 분포를 따르는 배전급 옥내용 진공차단기의 신뢰성시험을 위한 형상 모수의 값을 4.0으로 추정하는 것이 타당하다.

## 2.4 신뢰성평가시험

### 2.4.1 장기과전시험

#### 1) 시험전압과 기간의 결정

진공차단기에 사용되는 절연물의 전기적 열화 특성은 다음의 실험식으로 표현된다.

$$k = \frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{-1/a}$$

여기서,  $V_1$  ; 시험전압,  $V_2$  ; 운전전압,  $T_1$  ; 시험기간,  $T_2$  ; 등가수명이다.

$a$ 의 값은 전압열화의 종류에 따라 다른데, 예폭시 절연물의 무 void 조건에서는 14 - 16 정도로 알려져 있으므로, 가속시험기간과 등가수명의 관계에서 시험기간의 증가에 따른 검증과정의 유효성을 높이고자 가속시험기간에 대한 등가수명의 비, 즉 가속계수가 최저가 되는  $a=14$ 를 적용하여 진공차단기의  $B_{10}$ 수명 20년 (7,300 일)을 보증하기 위한 시험기간을 산정하기 위해서 시험전압 ( $V_1$ )과 운전전압 ( $V_2$ )의 비, 즉 전압배수( $k$ ) 1.4에서 시험기간을 결정한다.

#### 2) 시험방법

장기 과전 시험은 실 사용상태와 동일한 상태로 설치된 조건으로 실시하며, 시험을 실시하는 동안 외부의 절연파괴가 일어나지 않도록 설치에 주의를 요한다. 이 시험을 위한 전원은 그림 6과 같이 단상 전원으로 구성한다.

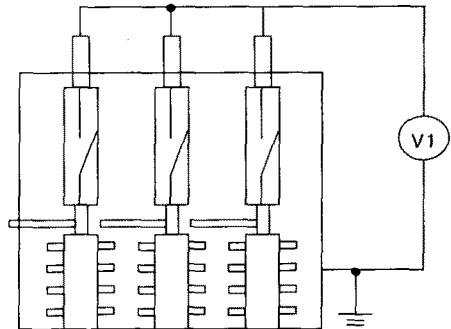


그림 6. 상 대지간 장기과전 시험회로 구성

수명이 와이블 분포(형상모수  $\beta$ 는 기지)를 따르는 제품  $n$ 개를  $T_0$ 시간 동안 시험하여 고장이 발생하지 않은 경우  $B_q$ 의  $100(1-a)\%$  신뢰하한은 다음과 같다. 즉,

$$B_q = \left[ \frac{-2n(T_0)^\beta \ln(1-q)}{x^2(2, a)} \right]^{1/\beta} \geq t_0$$

이면, 합격 판정한다.

$n$ 이 주어진 경우 위 식을  $T_0$ 에 대해서 풀면,

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

이다. 따라서  $n$ 개의 아이টে으로 시험하여  $T_0$ 시간 동안 고장이 발생하지 않으면 합격 판정한다.

따라서 수명이  $\beta=4.0$ 인 와이بل 분포를 따르는 아이টে에 대해서  $B_{10}$ 수명이 20년 이상임을 유의수준  $\alpha=0.1$ (신뢰수준 90%)로 보증해야 하는 상황에서 시험 아이টে의 수가 2개일 때, 무고장 시험으로 평가하기 위한 시험기간  $T_0$ 는  $n=2$ ,  $t_0=20$ (년),  $\alpha=0.1$ ,  $q=0.1$ 이므로

$$T_0 = 20 \left( \frac{\ln(0.1)}{2 \times \ln(1-0.1)} \right)^{1/4} = 36.36$$

이 된다.

가속조건에서의 시험기관과 사용조건에서의 시험기간의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{가속조건 무고장 시험기간} &= \\ \frac{1}{A} \times \text{사용조건 무고장 시험기간} \end{aligned}$$

따라서,  $k=1.4$ 에서 가속계수 111.1을 적용하여 가속조건 무고장 시험기간을 일로 환산해서 구하면 다음과 같다.

$$36.36 \times 365 / 111.1 = 119.5 \text{ (일)}$$

### 2.4.2 다수회 개폐동작시험

전기적 가속시험을 실시한 시료 중 한대를 발취하여 성능평가시험에서 실시하는 기계적 내구성 시험과 동일하게 무부하 상태에서 다수회 개폐시험을 실시한다. 차단기는 적용 환경에 따라 개폐 동작하는 회수가 다르고 1일 또는 1년 동작회수의 평균을 산출하는 것은 실질적으로 불가능하므로 기계적 메커니즘의 신뢰성을 검증하기 위해 다수회 개폐동작시험을 M1 급 차단기에 대해서는 성능평가시험에서 실시하는 개폐동작 회수의 최대 2.5배인 5,000회, M2급 차단기에 대해서는 25,000회 까지 시험을 실시하여 개폐수명의 회수를 등급을 나누어 구분하여 보증하는 방법으로 기계적 신뢰성을 평가한다.

### 2.4.3 진공 인터럽트 진공도 검사

진공 차단부, 즉 진공 인터럽트는 진공차단기의 핵심 요소로서 진공도 저하에 따른 고장 발생은 드물지만, 일단 진공도 저하 등 진공압력의 변화가 급격히 진전되면 절연파괴에 이르므로 진공압력을 마그네트론 법으로 측정하여 진공압력의 1주당 변화율이 20년 이상을 보증하는 결과가 얻어져야 신뢰성 시험을 합격한 것으로 판정한다.

$$P_t - P_0 < (P_t - P_0) \frac{T_t}{T_i}$$

- $\therefore P_t$ : 일정기간 방치 후의 진공 압력
- $P_0$ : 제작 직후의 진공 압력
- $P_t$ : 허용 진공 압력
- $T_t$ : 경과 시간
- $T_i$ : 보증 시간

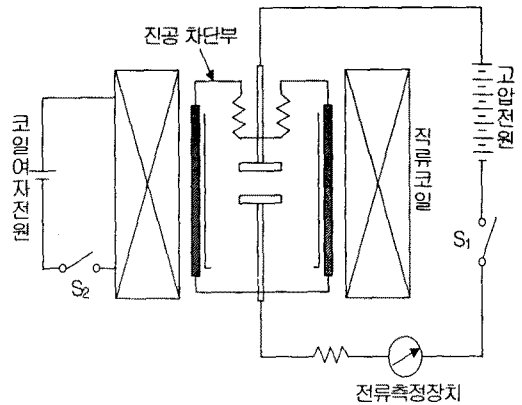


그림 7. 마그네트론 시험법에 의한 진공압력의 측정

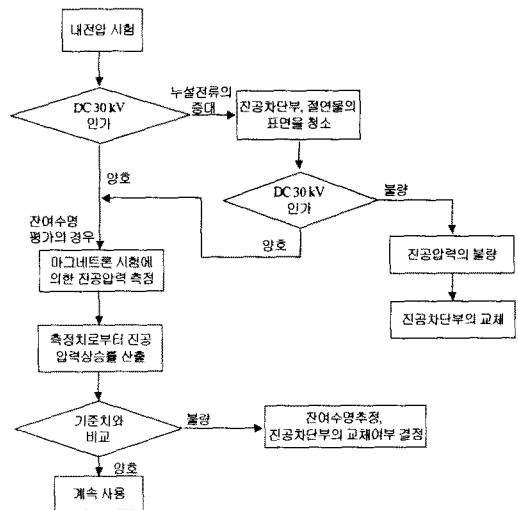


그림 8. 진공도 검사의 절차

## 3. 결 론

육내용 배전급 진공차단기의 신뢰성을 평가하는 방법으로 장기파전에 의한 가속수명시험을 실시하여 전기적 신뢰성을 평가하고, 다수회 개폐시험을 통한 기계적 내구성시험을 실시하고 최종적으로 진공인터럽트의 진공도 검사를 행하는 방법을 제안하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] "공정전기설비의 수명과 Maintenance에 관한 앙케트 조사 보고", 일본 전기학회 기술보고 II부 제 159호.
- [2] W. Nelson, "Weibull Analysis of Reliability Data with Few or No Failures", J. of Quality, Vol. 17, No. 3, pp140-146 (1985).
- [3] KS C 6430, "신뢰성 보증 전자부품 통칙".
- [4] 정해성 외 3인, "신뢰성분석과 응용" 영지문화사.
- [5] 김명수, 유동수, "신뢰성평가를 위한 기본개념과 시험조건 의 결정", 제2회 부품·소재 신뢰성 워크샵 논문집 (2001).