

가스절연개폐장치용 절연스페이서의 수명평가

김민규*, 이정기*, 김익수, 정주영*, 오창수**
한국전기연구원*, 한국전력공사**

Lifetime Evaluation of Insulating Spacer used in Gas Insulated Switchgear

M. K. Kim*, J. G. Lee*, I. S. Kim, J. Y. Jeong*, C. S. Oh**
KERI*, KEPCO**

Abstract - In this paper, a method to assess the reliability of an insulating spacer used in gas insulated switchgear by electrical accelerated lifetime test is represented. And a test plan to assure the expected lifetime with 90 % confidence level is also included.

1. 서 론

송변전 계통에서 이용되고 있는 고압차단기는 SF6 가스를 절연매질로 이용한 가스차단기가 다수를 점하고 있으며, 가스절연개폐장치(Gas Insulated Switchgear, 이하 GIS라 표기) 형태로 설치되어 운용되고 있다. GIS는 일반적으로 20년 이상 이용되고 있으며 높은 수준의 신뢰성이 확보되어야 한다. GIS의 높은 신뢰성을 확보하는 것은 매우 중요하지만, 시스템에 포함된 부품의 수가 많아 복잡하고 보수 및 수리에 소요되는 시간 등이 이전의 개폐장치와 비교해서 변전소의 가용성에 근본적인 영향을 미치게 된다[1].

GIS에서 가장 critical한 부품은 예폭시 절연물이며 대표적인 것이 스페이서(spacer)이다. 이러한 GIS에 사용되는 고체절연물인 스페이서의 신뢰성평가방안의 마련은 전력공급의 신뢰성을 향상시키기 위해 그 필요성이 요망되고 있어 수명보증에 관련된 가속수명시험 사항을 포함한 신뢰성평가기준의 제정이 필요하다.

GIS용 절연스페이서의 품질, 즉 성능을 평가하는 시험방법은 IEC 62271-203 등의 규격에 나와 있다[2]. 절연스페이서의 신뢰성을 시험하기 위한 규격은 지금까지 수요기업인 한국전력공사의 구매시방서 또는 시험검사항목으로 정한 것이 있었으나, 수명보증을 위한 가속수명시험의 조건을 명확하게 정해놓지 않아 제작사 간 시험실시방법의 차이에 따른 평가결과의 신뢰성에 문제가 대두 될 수 있는 바 GIS용 절연스페이서의 사용환경 및 소재의 장기간 사용 특성을 충분히 고려한 시험방법의 채택이 필요하였으며 신뢰성평가를 위한 기준을 제정하였다. 본 논문에서는 수명평가방법의 개요 및 수명보증 방안에 대해 소개한다.

2. 본 론

2.1 신뢰성평가 계획

신뢰성시험은 많은 비용과 시간이 소요되므로 기획단계에서부터 시험의 목적, 방법, 일정 등을 규정한 신뢰성시험 계획을 수립하여야 한다. 과거의 경험, 데이터, 기술정보를 충분히 검토하고 분석하여 시험항목, 스트레스의 종류와 수준, 시료의 수, 시험기간, 측정 파라미터와 방법 등을 결정해야한다. 이 중에서 시험기간 및 비용과 관련된 시료수의 결정방안에 대해 검토한 결과를 소개한다.

2.2 시료수의 결정

신뢰성시험에서 가장 큰 문제의 하나가 시험에 많은 시간과 시료가 필요하다는 점이다. 즉 마모고장의 경우는 마모현상이 나타날 때까지 장기간의 시험을 해야 하고, 고장률이 작으면 많은 수의 시료가 필요하게 된다. 따라서 개발단계에서 적은 수의 시료로 신뢰성을 보증하고자 할 때 최대의 어려움이 있다.

(가) 고장률 보증시험

MIL-STD-690-C(: Failure rate sampling plans and procedures)에 명시된 고장률보증시험의 내용은 다음과 같다.

① 시험방법 및 판정기준

n개의 시료를 t_0 시간동안 시험을 실시하고 고장이 r개 이하이면 평균수명 θ_0 (또는 고장률 λ_0)를 신뢰수준 $100(1-\alpha)\%$ 로 보증한다.

② 시료의 크기 또는 시험기간의 결정[3]

고장시간이 지수분포를 따르는 n_0 개의 시료를 t_0 시간동안 시험하였을 때 고장이 r개 발생하더라도 신뢰수준 $100(1-\alpha)\%$ 로 평균수명 θ_0 를 보증할 수 있는 시료수 또는 시험기간은 다음 식을 만족한다.

$$T_0 \geq \frac{\theta_0 \chi_{\alpha}^2(2r+2)}{2} \quad (1)$$

여기서, T_0 는 총 시험시간이며, $T_0 = n \times t_0$ 이고, $\chi_{\alpha}^2(2r+2)$ 는 자유도가 $2r+2$ 인 χ^2 분포의 $100(1-\alpha)\%$ 백분위수를 나타내며, r은 허

용고장수이다. 따라서 시험시간 t_0 이 주어지면 시료수 n_0 를 결정할 수 있고 반대로 시료수 n_0 가 주어지면 시험시간 t_0 을 다음과 같이 결정할 수 있다.

- 시험시간 t_0 가 주어졌을 때, 시료 수 n의 결정

$$n \geq \frac{\theta_0 \chi_{\alpha}^2(2r+2)}{2t_0} \quad (2)$$

- 시료수 n_0 가 주어졌을 때 시험시간 t_0 의 결정

$$t_0 \geq \frac{\theta_0 \chi_{\alpha}^2(2r+2)}{2n} \quad (3)$$

지수분포를 따르는 경우 총 시험시간이 같으면 같은 정도로 신뢰성을 보증할 수 있다. 따라서 시험시간에 제약이 있으면, 시료수를 늘려 총 시험시간이 같도록 하면 동일한 신뢰성을 보증할 수 있다. 또한 가속계수를 알고 있는 경우 가속계수에 반비례하여 시료수와 시간을 줄일 수 있다.

(나) Weibull 분포를 따른 경우

아이템의 수명(T)이 형상모수 β , 척도모수가 η 인 Weibull 분포를 따르고 β 를 알고 있으면(또는 추정치가 가용하면), T^{β} 은 평균수명이 η^{β} 인 지수분포를 따른다. 따라서 앞에서 구한 지수분포의 결과를 이용하여 Weibull 분포에서 시료수와 시험시간을 결정할 수 있다.

n_0 개의 시료를 정해진 시간 t_0 까지 시험을 하고, 고장이 r개 발생하더라도 신뢰수준 $100(1-\alpha)\%$ 로 B_0 수명을 보증할 수 있는 시료수 또는 시험기간은 다음의 식을 만족한다.

$$\left[\frac{2T}{\chi_{\alpha}^2(2r+2)} \times \ln(1-x)^{-1} \right]^{\beta} \geq t_0^{\beta} \quad (4)$$

여기서 $T = n \cdot t_0^{\beta}$ 이고, t_0^{β} 는 목표수명이다.

- 시험시간 t_0 가 주어져 있을 때, 시료수 n_0 의 결정

$$n \geq \left(\frac{t_0^{\beta}}{t_0} \right)^{\beta} \times \frac{\chi_{\alpha}^2(2r+2)}{2} \times \frac{1}{\ln(1-x)^{-1}} \quad (5)$$

- 시료수 n_0 가 주어져 있을 때, 시험시간 t_0 의 결정

$$t_0 \geq \left[\frac{t_0^{\beta}}{n} \times \frac{\chi_{\alpha}^2(2r+2)}{2} \times \frac{1}{\ln(1-x)^{-1}} \right]^{1/\beta} \quad (6)$$

표 1은 신뢰수준(60%, 90%), t^{β}/t_0 , β , r값이 주어졌을 때, B_{10} 수명을 보증하는 시료 수를 구하기 위한 표이다.

〈표 1〉 B_{10} 수명 보증을 위한 시료수

t^{β}/t_0	β	신뢰수준 : 60%				신뢰수준 : 90%			
		0	1	2	3	0	1	2	3
1.5	1	14	29	45	60	33	56	76	96
	2	20	44	67	90	50	84	114	143
	3	30	65	100	134	74	125	171	215
2.0	1	18	39	59	80	44	74	102	127
	2	35	77	118	159	88	148	203	254
	3	70	154	236	318	175	296	405	508

예를 들어 아이템의 수명이 Weibull 분포를 따르고 형상모수 β 가 2.0으로 알고 있다. 500시간동안 시험하여 고장을 1개까지 허용할 때, B_{10} 수명 1,000(시간)을 신뢰수준 60%로 보증하기 위한 시료의 수는 다음과 같다. 표 1에서, $t^{\beta}/t_0 = 1,000/500 = 2$, 신뢰수준 = 60%, $\beta = 2.0$, r=1에 대응하는 셀을 찾으면 시료의 수는 77개이다.

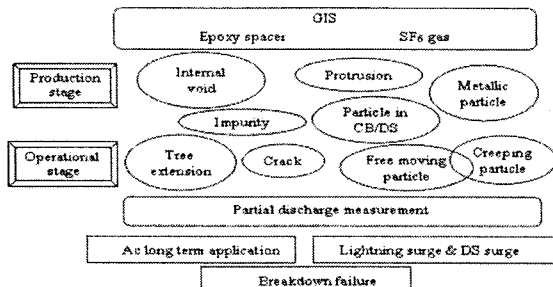
2.3 고장메커니즘 분석

절연스페이서의 수명은 전압스트레스에 의한 전기적 수명과 전류 통전에 의한 열전달에 의한 열화 및 차단기 개폐동작에 기계적 내구성/강도 저하 및 경년에 의한 절연물의 열화 등에 의해서 결정된다. 표 2는 절연스페이서가 운전 중에 받게 되는 스트레스에 의한 고장메커니즘 및 대응하는 시험방법을 나타낸다.

2.4 가속수명시험

신뢰성시험에서 최대의 난제는 “수와 시간의 벽”이다. 이 문제를 해결하는 방법이 가속시험이다. 가속시험이란 시험시간을 단축할 목

적으로 기준보다 가혹한 조건에서 실시하는 시험으로 정의할 수 있으며(KS A 3004), 실 사용조건보다 가혹한 조건(온도, 습도, 진동, 전압, 전류) 또는 사용률을 높여 시험하여 빠른 시간 내에 설계 완성도를 평가하거나 수명(신뢰도)을 평가하기 위한 시험이다.



<그림 2> GIS 절연성능에 영향을 미치는 요소[1]

<표 2> 고장모드와 시험방법의 관계

고장모드 / 메커니즘	시험방법					
	내하중	기밀 시험	부분 방전	냉열 시험	장기 과전압	온도 상승
기계적강도 저하	◎	○	○	◎	○	◇
가스누기	○	◎	○	◎	○	◇
절연저하	◇	◇	◎	◇	◎	◇
열적 열화	◇	◇	◇	◎	◇	◎

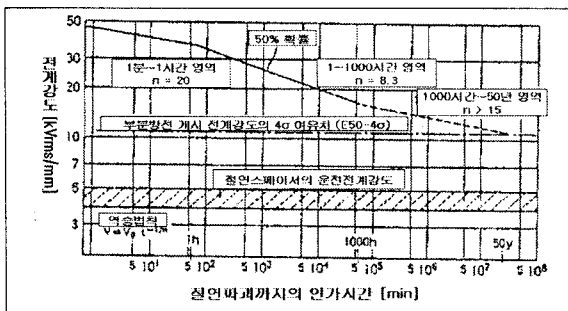
신뢰성 관련 중요도 표시 ◎:가장중요, ○:중요, ◇:보통

2.4.1 전압 가속시험 설계

가속모델은 스트레스 가속시에 적용되며, 대상 시료의 수명과 스트레스의 관계를 나타낸다. 즉 수명분포의 모수(평균, 표준편차 등)를 스트레스 변수들의 함수로 표현하는데, 가속수명시험 계획의 수립과 자료 분석시 매우 중요하다. 전압스트레스가 가속자인 경우에 적용하는 가속모델인 역승 법칙의 일반형은 다음과 같이 표현된다[4], [5].

$$t = \frac{1}{k V^n} \tag{7}$$

(7)식의 양변에 ln를 취하면 인가전압(전계강도)과 절연과거 시간의 관계는 다음 그림 2와 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림 2에서 근사화된 직선의 기울기가 전압열화계수 n을 의미한다.



<그림 2> V-t 특성 시험 결과 예[6]

에폭시 소재인 스페이서에서 n값은 제조사가 실시한 장기과전시험을 근거로 16을 채택하였다. 특히 일본 및 독일의 여러 제조사가 발표한 자료를 정리하면 표 3과 같다.

<표 3 에폭시 절연물 V-t 특성시험에서 n값 범위 결정>

발표 기업(년도)	n의 범위	조건
Toshiba(1997)[6]	> 15	1,000시간 ~ 50년 전압인가
Takaoka(1987)[7]	10 ~ 20	에폭시 절연물
Siemens(1989)[1]	10 ~ 15	에폭시 절연물

따라서 장시간 영역(1,000 시간 초과)에서의 과전시험에 의한 가속수명시험을 실시하여 수명을 보증하는 경우에는 n의 값으로 16에서 20의 값을 선정하는 것이 타당하며, 가속시험결과의 유효성을 높이기 위해서 가속계수가 작은 16을 채택하는 것이 합리적인 것으로 판단된다[8].

2.3.2 수명평가를 통한 신뢰성인증

일반적으로 전기기기의 절연을 목적으로 이용되는 에폭시 등 폴리머계 절연물의 수명평가에 의한 신뢰성분석에서는 Weibull 수명분포를 가정해서 해석을 하고 있으며, Weibull 분포를 따르는 해석에서 얻어진 형상모수 β의 범위는 0.6에서 1.4의 범위를 갖는 것으로 보고 되고 있다[6]. 따라서 전압가속에 의한 수명평가를 실시하

여 절연스페이서의 신뢰성을 입증하기 위한 평가기준에서는 전기적 스트레스에 의한 열화가 고장메커니즘으로 적용 가능하며, 욱조곡선(Bathtub-curve)에서 고장률 일정영역에서 증가영역으로 변화된 wear-out의 고장형태가 발생하기 시작하는 영역 즉, 열화에 의한 고장해석에 Weibull 분포를 적용 가능한 최소 형상모수인 β를 1.1로 선정하였다.

식 (6)을 이용하여 목표수명 B₁₀=25년을 보증하기 위한 시험조건을 계산하면, 신뢰수준 90 %에서 다음과 같은 시험시간이 구해진다.

<표 3> 시료수 변화에 따른 정상조건 시험시간의 산정

시료수, n	2	3	4	5
정상조건에서 시험시간 [hours]	1,925,430	1,331,820	1,025,350	837,080

인가전압을 사용전압보다 높여서 가속시험을 실시하는 경우, 전압가속에 의한 가속계수는 다음과 같이 구해진다. 식 (7)에서 시험전압과 운전전압과의 관계에서 다음과 같이 변환될 수 있다.

$$\frac{V_1}{V_n} = \left(\frac{T_1}{T}\right)^{-1/n} \tag{8}$$

여기서 T : 제품의 기대수명(년), T₁ : 피시험품의 시험년수(년), V₁ : 시험시의 과전압치, V_n : 실제동 운전전압이며, 가속계수 AF는 다음과 같이 구해진다.

$$AF = \left(\frac{T}{T_1}\right) = \left(\frac{V_1}{V_n}\right)^m \tag{9}$$

따라서 1.4배의 과전압을 인가하는 경우, 가속계수는 식 (10)과 같다.

$$AF(\text{전압가속계수}) = \left(\frac{1.4}{1.0}\right)^{16} = 217.7953 \tag{10}$$

그리고 인가하는 과전압치의 크기별 가속계수는 표 4와 같이 정리된다.

<표 4> 인가 과전압 배수에 대한 가속계수

과전압배수(k)	1.4	1.5	1.6
가속계수(AF)	217.7953	656.8408	1844.6744

따라서 시료수 별 과전압 배수의 차이에 따른 가속수명 시험시간을 계산하면 표 5와 같이 정리된다.

<표 5> 시료수 별 과전압 배수의 차이에 따른 가속시험시간 [hours]

과전압배수 / 시료수	1.4	1.5	1.6
2	8,850	2,935	1,045
3	6,120	2,030	725
4	4,710	1,565	560

시험조건에서 제시된 여러 계수들의 적합성이 확인될 수 있도록 장시간 영역인 1,000 시간 이상이 최저 가속시험시간이 되는 조건에서 제조자와 협의하여 시료수 및 시험시간을 정한다.

3. 결 론

본 논문에서는 GIS용 절연스페이서의 수명평가를 통한 신뢰성평가방법을 소개하였다. 에폭시 절연스페이서에 대한 수명평가방안으로 전압스트레스 가속시험을 실시하여, 목표수명의 보증을 위한 통계학적 접근방법을 통한 인증조건을 제시하였다. 향후 고신뢰성 조고압 GIS의 개발을 위해서는 폴리머계 절연물의 신뢰성향상이 필수적이며, 이를 위한 수명평가방안에 관한 연구가 더욱 필요할 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] A. Diessner, G. Luxa, W. Neyer, "Electrical Aging Tests on Epoxy Insulators in GIS", IEEE Trans. on EI, Vol. 24, No. 2, 1989.
- [2] IEC 62271-203(2003), "High-voltage switchgear and controlgear-Part 203: Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages above 52 kV.
- [3] 서순근, "Minitab 신뢰성분석", 이레테크, 2006.
- [4] "ガス絶縁開閉装置の仕様/保守基準", 電気産業協同研究會 第52巻 第1号.
- [5] ANSI/IEEE Std 930-1987, "IEEE Guide for the Statistical Analysis of Electrical Insulation Voltage Endurance Data".
- [6] M. Honda et al., "V-t Characteristics of Epoxy Mold Insulation for Sustained AC Voltages" IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No.5, pp 1017-1023, 1984.
- [7] H. Hirose, "A Method to Estimate the Lifetime of Solid Electrical Insulation", IEEE EI., Vol. 22, No. 6, 1987.
- [8] 青柳浩邦 外, "エポキシ柱形品の長時間寿命特性", 電気學會全國大會, No. 331, pp 42, 1974年.