

38kV VCB용 에폭시부싱 신뢰성평가

김민규, 허대행, 김익수  
한국전기연구원

Reliability Assessment of Epoxy Bushing used for VCB rated 38kV

M. K. Kim, D. H. Huh and I. S. Kim  
Korea Electrotechnology Research Institute

**Abstract** - This paper describes a testing method to assess the reliability of the epoxy bushing used for the vacuum circuit breaker(VCB). Especially, in order to show the long-term durability of epoxy bushing in a short testing duration, the extremely accelerated electric stress applying test plan was adopted.

의 설치환경 차이에 따라 온/습도 조건을 달리한 열충격시험 또는 냉열시험을 통해 설치환경에 대한 내구성을 가지고 있음을 검증할 필요가 있다. 장기 내구 신뢰성을 검증하기 위한 시험방법으로는 옥외 가공용 기기에 설치되는 에폭시부싱에 대해서는 옥외 사용조건 및 자연환경을 모의한 복합열화시험을 실시하는 방법과 옥내용으로 이용되는 기기의 경우 전기적 가속수명시험이 있다.

1. 서 론

1997년 교토의정서 발의 후 전기산업에서도 지구온난화 가스의 사용 억제 위해 SF<sub>6</sub>가스 절연을 대체할 수 있는 고체절연 및 건조공기(Dry-air) 절연 등 절연매질의 변경이나 대체가스를 이용하는 친환경 소재를 이용한 전력기기의 개발에 박차를 가하고 있는 실정이다.

이와 같은 연구개발의 추세에 발맞춰 기존의 자기재 절연물을 에폭시 등 폴리머계 절연물로 대체하고자 하는 연구개발 패러다임의 변화 및 고신뢰성 폴리머계 절연물의 개발 필요성 또한 초고압전력기기 응용을 위해 한층 강조되고 있다.

VCB는 전력계통에서 고장 발생시 신속히 자동적으로 전력 수송을 차단하기 위한 보호 장치인 전력용 차단기의 한 종류로서 진공을 소호매질로 이용하고 있다. VCB의 특성은 소형으로서 수명이 길고 차단기로서 기본적으로 필요한 고속도, 고신뢰 개폐의 가능 및 차단성능이 우수하다는 것이 가장 큰 장점이다. 이러한 VCB는 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. 오늘날 친환경절연 개폐장치의 차단부는 진공인터럽터를 이용하고 기타 외부절연 및 전기도전부인 부싱은 에폭시 등 폴리머계 절연물로 절연하는 구조를 가져가고 있다.

본 논문에서는 VCB 사고의 주요부품이며, 오늘날 널리 이용되는 에폭시 소재를 주 절연재로 이용하고 있는 부싱의 신뢰성평가를 위한 가속수명시험방법으로 VCB에서 적용한 가속수명평가시험을 근간으로 신뢰수준 90%에서 B<sub>10</sub> 수명 20년을 보증하는 과전압 스트레스를 조정한 신뢰성평가방법을 소개한다.

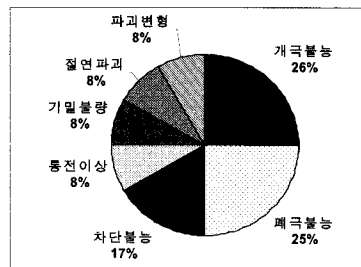
2. 본 론

2.1 VCB 고장원인 및 고장형태

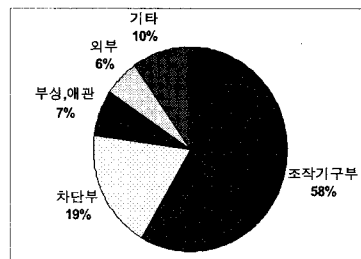
국내에는 VCB의 고장에 대한 자료가 정리되어 있지 않아서 일본 전기학회 기술보고 자료를 참조하여 고장자료를 분석한 결과를 그림 1에 나타내었다. 고장발생의 원인은 제작불완전이 가장 높았으며, 고장현상을 분석해보면 개구 및 폐구 등 기계적 동작의 불량(51%)을 차지하며, 차단, 통전, 절연파괴 등 전기적 고장현상이 33%를 차지하며, 그밖에 재료의 특성과 관련된 사항이 16%를 차지하고 있다. 또한 차단기에서 조작기구부의 고장이 주요 고장원인이 되고 있으며, 고장개소의 분석에서도 높은 비중을 차지하고 있다. 따라서 VCB에 대한 신뢰성평가에서는 반드시 차단부의 기계적동작에 대한 수명 또는 성능의 보증을 위한 별도 항목시험이 필요하며, 동작회수에 대한 보증방법을 VCB의 신뢰성평가기준에서는 채택하고 있다. 그리고 VCB 고장에서 전기적 고장의 대부분을 차단부의 차단불능이나 통전이상에 관련된 것이 2/3를 차지하고 있는데, 이에 대한 성능 및 신뢰성 평가는 고전압, 대전력시험을 통해 검증될 수 있다. 그림 2에서 VCB 고장의 발생개소별로 분석한 결과를 보면 조작부 및 차단부 고장발생 장소의 대부분을 차지하고 있으며, 그 밖에 부싱, 애관 및 외부의 절연부에 대한 고장이 차지하고 있다.

2.2 VCB용 에폭시부싱 신뢰성평가

개폐기용으로 개발된 폴리머계 부싱 또는 에폭시부싱에 대한 형식시험에서 적용 가능한 성능평가항목으로는 크게 전기적 절연시험 및 내환경시험으로 대별할 수 있다. 전기적절연시험에서는 뇌충격전압 및 ac 내전압시험, 부분방전시험을 통해서 전기적특성의 성능평가를 할 수 있으며, 개폐기



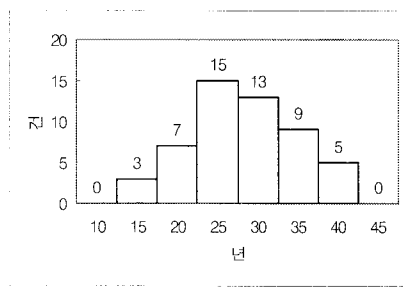
<그림 1> VCB 설비 불완전에 의한 고장 - 현상별



<그림 2> VCB 설비 불완전에 의한 장애 - 고장개소별

2.3 VCB 수명분포 및 모수 추정

VCB에 대한 국외의 고장자료에서 수명분포는 그림 3과 같다. 이 자료에서 고장시간에 대한 확률밀도함수(pdf)와 고장률 함수의 관계를 구해보면 고장률이 시간에 대해 증가하는 와이بل 분포를 따르고 있음을 추정할 수 있다.



<그림 3> VCB 수명분포

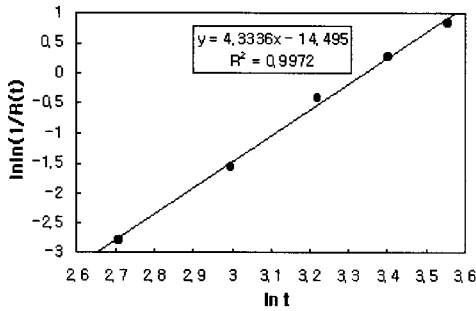
와이بل 수명분포에서 형상모수 β와 척도모수 θ를 최소제곱법을 써서 β와 θ의 추정 값을 구하면 다음과 같다. 신뢰도함수 R(t)를 구하고 그림 4와 같이 양대수 함수를 취해 얻어진 회귀곡선에 대해 최소자승법으로 와이بل 분포의 모수를 구한다.

그림 4에서 직선의 기울기 4.33은 형상모수 β에 해당하며, n의 추정치는  $n = \theta^{\beta}$ 이므로  $\hat{n}$ 와  $\hat{\theta}$ 는 다음과 같이 얻어진다.

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

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

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



〈그림 4〉 와이불분포 모수 추정

형상모수의 값 4.33은 진공차단기 전반에 대해 조사한 자료로부터 구한 것으로 모집단의 범위가 광범위하다는 특수성이 있으므로, 배전급 옥내용 진공차단기의 신뢰성시험을 위한 형상 모수의 값을 4.0으로 추정하는 것이 타당하다.

## 2.4 장기 내구 신뢰성평가

### 2.4.1 장기과전압 수명시험

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

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

이면, 합격 판정한다.

$n$ 이 주어진 경우 위 식을  $T_0$ 에 대해서 풀면,

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

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

따라서 수명이  $\beta=4.0$ 인 와이불 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  $n=2$ ,  $t_0=20(\text{년})$ ,  $\alpha=0.1$ ,  $q=0.1$ 이므로

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

이 된다.

가속조건에서의 시험기간과 사용조건에서의 시험기간의 관계는 전압스트레스로 가속시켜 수명시험을 실시하는 경우에 적용하는 역승 모델(Inverse Power model)에 근거하여 부싱의 전극구조 및 예폭시소재로 발표된 결과들을 종합하여 V-t 특성에서 전압열화계수를 14로 산정하여 가속조건에서의 시험시간을 다음과 같이 산출하였다.

$$\text{가속조건 무고장 시험기간} = \frac{1}{A} \times \text{사용조건 무고장 시험기간}$$

가속수명시험에서 일반적으로 적용하고 있는 과전압스트레스의 범위는 1.2배 이상에서 시험한 결과가 대부분으로 시험결과의 유의성과 시험시간과 비용을 함께 고려하여 장시간이 소요되지 않고, 가능한 이른 시간에 결과를 도출하기 위해 과전압스트레스의 범위를 1.5배까지 확대하여 적용하였다. 따라서, 전압배수( $k$ )=1.5에서 가속계수 291.9를 적용하여 가속조건 무고장 시험시간을 일수로 환산해서 구하면 다음과 같다.

$$36.36 \times 365 / 291.9 = 46 (\text{일})$$

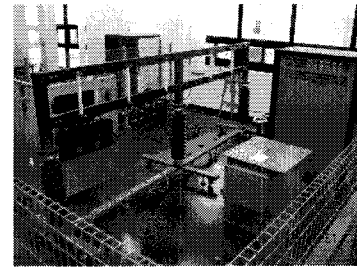
〈표 1〉 과전압배수에 따른 가속시험기간

과전압 배수	가속계수	가속시험기간
1.5	291.9	46일

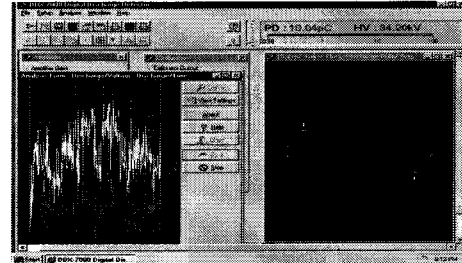
### 2.4.2 장기과전압 시험 회로구성

VCB용 예폭시부싱을 그림 5와 같이 설치환경과 동일하게 외함에 결합된 형태로 설치하고, 가속시험조건은 상대지전압의 1.5배인 32.9 kV를 46일 이상 연속인가하면서, 실시간으로 부분방전 및 부하전류의 검출이 가능한 설비를 이용하여 장기과전압 수명시험을 실시한다.

그림 6은 시험전압이 인가된 상태에서 부분방전량을 실시간으로 측정하고 있는 장면이다. 이와 같이 1.5배의 과전압스트레스를 2개의 시료를 대상으로 46일 이상 연속인가하여 과과방전이 발생하지 않으면, 종료 후에 최종적으로 절연물의 건전성을 확인하기 위해 상용주파내전압시험 및 뇌충격내전압시험을 실시한다.



〈그림 5〉 시험회로 구성



〈그림 6〉 시험인가시 실시간 부분방전 측정에

## 3. 결 론

VCB에서 이용을 목적으로 제작된 예폭시부싱의 신뢰성평가 방안으로 VCB 시스템에 적용한 1.4배 과전압스트레스를 이용한 가속수명시험보다 전압을 더욱 가속시켜 실시하는 방안을 제안하였다. 부싱은 VCB시스템을 구성하는 단위부품으로 전체시스템의 고신뢰도로 유지하기 위해서는 단위부품의 신뢰도 보다 높은 수준으로 관리해야 한다. 본 논문에서는 과전압스트레스의 유의성과 시험시간 및 비용측면을 함께 고려하여 신뢰성시험계획을 수립한 내용을 소개하였다.

### 〈참 고 문 헌〉

- [1] "공정전기설비의 수명과 Maintenance에 관한 양케이트 조사보고", 일본 전기학회기술보고 II부, 제159호.
- [2] W. Nelson, "Weibull analysis of reliability data with few or no failures", J. of Quality, Vol. 17, No. 3, pp 140-146, 1985.
- [3] 지식경제부 기술표준원, "배전급 옥내용 진공차단기 신뢰성평가기준 RS C 0029".