

계단형 전압 스트레스 기반 전력기기 에폭시 절연물의 전기적 수명 평가

정종철*, 권정훈*, 김명진**
LS 일렉트릭*, 충북대학교**

Step-Stress Based Electrical Lifetime Prediction of Epoxy Insulator for Power Equipment

Jongchul Jung*, Jung-Hun Kwon*, Myungchin Kim**
LS Electric Co., Ltd.*, Chungbuk National University**

Abstract - 배전반 전력기기의 전기적 절연을 확보하기 위하여 에폭시 복합물이 폭넓게 사용되고 있으며, 이러한 절연물의 전기적 수명 평가를 위하여 일반적으로 장시간 동안 일정 전계를 인가하는 가속 수명시험이 수행되고 있다. 그러나, 이러한 일정 전계 시험은 시험 시간이 오래 걸리는 단점이 있어서, 최근에는 계단형 전압 스트레스를 인가하여 전기적 수명을 평가하는 연구가 시도되고 있다. 계단형 전압 스트레스를 인가하는 방법은 인가 전압을 상승시켜 빠른 시간 내에 절연 파괴에 도달시키는 방법이나, 아직까지 많은 실험적 연구가 진행되지 않고 있다. 본 논문에서는 배전반 계기형 변성기에 사용되는 에폭시 절연물 대상으로 계단형 전압 스트레스를 인가시켜 절연 파괴 시간을 측정한 후, 누적 손상 모델과 역누승 수명-스트레스 관계식을 결합하여 iteration을 통해 최적의 voltage endurance coefficient를 구하고, 이를 이용하여 사용 전계에서의 전기적 수명을 평가 방법을 제시하여, 시험 시간 단축을 위한 계단형 전압 스트레스 인가 기반 전기적 수명 평가 방법의 타당성을 확인하고자 한다.

1. 서 론

전력기기 절연을 위하여 에폭시 절연물이 널리 사용되고 있으며, 전력기기의 신뢰성은 에폭시 절연물의 전기적 절연 성능과 관련되어 있다. 이러한 에폭시 절연물은 오랜 시간에 걸쳐 여러 외부적인 요소들, 예를 들어, 열, 산소, 수분, 전기적 스트레스 등으로 인하여 점진적 열화가 일어나는데, 결과적으로 그 원래의 기능을 상실하게 되어 전력기기의 고장을 유발하는 원인이 된다. 이러한 열화는 비가역적인 변화로 에폭시 복합물에서의 molecular weight reduction, chain scission, thermal oxidation 등의 매커니즘에 의해서 나타난다. 전력기기의 수명은 주로 절연물의 수명에 의존하며, 필드 환경에서 절연물이 얼마나 오래 그 기능을 유지할 수 있는지가 중요한 요건이 되며, 이러한 이유로 절연물 수명을 예측하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

일반적으로 절연물이 전기적 스트레스를 받는 경우, 절연물의 화학 반응 속도는 가해지는 전계와 더불어 증가되기 때문에 electrical accelerated aging을 통해 절연물의 열화를 가속화시켜 열화 속도와 해당 전계와의 관계식을 결정하는 방법에 의하여 절연물의 전기적 수명을 예측할 수 있다. 이러한 열화 속도와 전계와의 관계는 역누승 수명-스트레스 관계식을 따르는 것으로 알려져 있으며, 대표적인 수명 평가 방법으로는 사용 전압보다 높은 가속 조건의 일정 전압을 인가시켜 고전압 환경에서 절연물의 열화를 가속화시켜 절연물이 절연 파괴에 빠르게 도달하게 하여, 역누승 관계식을 통해 사용 전계에서의 전기적 수명을 추정하는 일정 전계 (constant voltage-time) 시험 방법이 있다. 그러나, 이 일정 전계 시험은 의미 있는 절연 파괴 시간 데이터를 얻기 위하여 수개월 내지 수년의 electrical aging 시간을 필요로 한다. 또한, 일정 전계 하의 시험에서는 얻어지는 절연 파괴 시간 데이터의 산포가 커서 결과적으로 추정되는 전기적 수명의 산포도 커지는 단점이 있다.

이러한 단점을 극복하고자, 계단형 전계를 인가하여 빠르게 절연 파괴에 도달시키는 시험 기법을 전기적 수명 평가에 활용하는 연구가 진행되고 있다. 이러한 방법은 절연물에 일정 전계

스트레스가 인가되던, 아니면 계단형 전계 스트레스가 인가되던 스트레스 유형에 상관없이 절연물에 누적되는 cumulative damage가 어느 임계 구간에 도달하게 되면 절연 파괴에 이르는 개념을 도입한 방법이다. 즉, 전기적 스트레스에 의하여 절연물에 누적되는 cumulative damage의 임계치는 어떠한 형태의 스트레스가 가해져도 statistical band 내에 머물게 되는데, 이러한 통계적 구간은 이상적인 경우라면 band width가 zero가 되어야 하나, 실험적 오차, 소재의 불균일성 등의 다양한 원인에 의하여 일정 밴드를 형성하게 된다. Tiwana and Reddy는 여러 계단형 전계 하에서 얻어진 절연 파괴 시점까지의 축적된 누적 손상값들의 선형 회귀 직선의 기울기가 zero가 되어야 한다는 개념을 도입하여, 역누승 관계식의 voltage endurance coefficient (이하, VEC 또는 n 값), n 값을 zero에서부터 일정 간격으로 증분시켜 회귀 직선의 기울기를 zero에 근접하게 만드는 n 값을 최종 n 값으로 산출하는 DEM (Damage Equalization Method) 방법을 소개하였다[1]. 또한, 모든 시험 데이터로부터 linear fitting을 수행해야 하는 DEM 방법의 단점을 극복하기 위하여, 후속 연구로 각 step-stress 별 확률 분포 적합을 통해 얻어진 대표값, 예를 들어, 와이블 분포의 scale parameter를 대상으로 linear fitting을 수행하는 방법을 통해 n 값을 추정하는 modified DEM 방법도 소개되었다[2]. Liu 등은 minimum distance 방법을 제시하였는데, 이는 와이블 분포의 scale parameter 대상으로 각 step-stress test에 의하여 생성된 V-t 커브에서의 직선간의 거리를 최소화 시키는 n 값을 최종값으로 산출하는 방법이다[3]. Xiao 등은 절연 파괴에 도달한 경우의 누적 손상값들이 차지하는 통계적 구간의 폭의 분산을 최소화 시키는 n 값을 실제 값으로 추정하는 방법을 제시하였다[4]. 그러나, 이러한 계단형 전계 인가에 따른 전기적 수명 평가 방법들에 대한 실험적 연구가 그다지 많지 않아 산업 현장에서 실제 환경에 적용하기에는 한계가 있다.

본 논문에서는 배전반 전력기기 절연물로 많이 활용되고 있는 에폭시 절연물에 대하여 계단형 전압 스트레스를 인가시켜 절연 파괴 시간을 측정한 후, 누적 손상 모델과 역누승 수명-스트레스 관계식을 결합하여 최적의 n 값을 구하고 사용 전계에서의 전기적 수명을 평가하는 방법을 제시하여 계단형 전압 스트레스 인가에 따른 전기적 수명 평가 방법의 타당성을 확인하고자 한다. 또한, 이러한 방법의 적용으로 전기적 수명 평가 시험 시간을 획기적으로 낮출 수 있는 가능성을 확인해 보고자 한다.

2. 본 론

2.1 계단형 전기적 스트레스에 의한 누적 손상 모델

에폭시 절연물이 전기적 스트레스에 의해 영향을 받을 때, 사용 전압보다 높은 전압을 인가시켜 얻은 절연 파괴 시간 데이터를 이용하여 외삽을 통해 사용 전계에서의 수명을 산출할 수 있다. 일반적으로 열화 특성이 전기적 전압 스트레스에 의존하는 경우, 식 (1)과 같은 역누승 (inverse power law) 수명-스트레스 관계식을 적용할 수 있다.

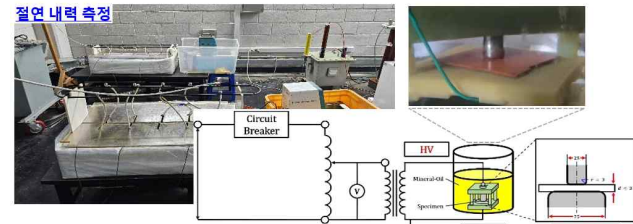
$$D = t \cdot E^n \quad (1)$$

여기서, D 는 시간 t 에서의 누적 손상량, t 는 시험 시간, E 는 인가전압, n 은 역누승 관계식의 VEC 값이다. 여러 인가 전압 레벨이 포함되는 계단형 전계 시험의 경우, 누적 손상량은 각 전압 레벨과 해당 레벨에서의 유지시간에 관계되며 식 (2)에 의하여 계산될 수 있다.

$$D_c = \sum_{i=1}^r \delta t_i E_i^n \quad (2)$$

여기서, D_c 는 절연 파괴 시점에서의 누적 손상량, r 은 절연 파괴 시점까지의 계단 수 (인가전압 레벨 수), δt_i 는 각 인가전압에서의 유지 시간, E_i 는 각 단계에서의 인가전압이다.

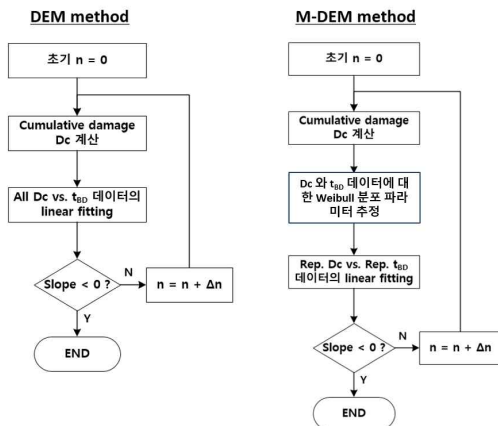
에폭시 절연물에 대한 절연 내력 시험을 위하여 그림 1과 같은 시험 장치를 구성하였다. 에폭시 절연물 시편은 가로 100 mm, 세로 100 mm, 두께 2 mm 크기의 정사각형 형태로 제작하였다. 에폭시 절연물 시편을 그림 1에서 보여지는 절연 내력 측정 장치에서 단시간 급상승 시험, 2kV/1min, 2kV/15min, 2kV/30min의 계단형 절연 내력 시험을 진행하였고, 각각의 시험에서의 절연 파괴 시간과 최종 절연 파괴 전압을 측정하였다.



〈그림 1〉 시험 장치 셋업

2.2 계단형 전계에 의한 방법별 VEC, n값 비교 평가

본 절에서는 계단형 전계 인가에 따른 절연 파괴 시험을 통해 얻어진 인가 전압 및 절연 파괴 시간 데이터를 통해 누적 손상값을 계산하고, 식 (2)를 이용하여 역누승 모델에서의 n 값을 추정하기 위하여 여러 방법들을 비교/적용하였다. DEM 방법에서는 역누승 관계식의 n 값을 0부터 일정 간격으로 iteration 시켜 누적손상값들에 대한 회귀 직선의 기울기를 zero에 근접하게 만드는 n 값을 최종 n 값으로 산출하였다[1]. Modified DEM 방법에서는 모든 누적 손상 데이터를 이용하는 것이 아니라 와이블 분포의 scale parameter 대상으로 선행 회귀 추정을 한 후 그 기울기를 zero에 근접하게 만드는 n 값을 산출하였다[2]. Minimum distance 방법에서는 와이블 분포의 scale parameter 대상으로 각 step-stress test에 의하여 생성된 V-t 커브에서의 직선간의 거리를 최소화 시키는 n 값을 산출하였다[3]. Minimum variance of bandwidth 방법에서는 누적 손상값들이 나타내는 밴드의 통계적 분산을 최소화 시키는 n 값을 선택하였다[4]. 참고로, DEM 방법과 modified DEM 방법에서 n 값을 도출하는 개략적인 플로우차트는 그림 2와 같다.



〈그림 2〉 DEM / Modified DEM 방법의 플로우차트 [1,2]

계단형 전계 시험 데이터를 이용하여 제시된 DEM method, modified DEM method, minimum distance method, minimum variance of bandwidth method 등의 각 방법별로 n 값을 산출해 본 결과, 산출된 n 값은 13.74 - 15.32의 범위에 위치하고 있는 것을 볼 수 있었다. 여기서, modified DEM 방법과 minimum distance 방법에서 채택한 대표값은 와이블 분포의 scale parameter를 적용하였다. 시험 결과를 보면, 계단형 전계 인가에 따라 산출된 n 값은 여러 문헌에서 보여지는 일정 전계 시험에 대한 일반적인 에폭시 복합물의 n 값 범위 ($n = 10 - 16$) 내에 머물고 있음을 볼 수 있다. 따라서, 본 논문에서 수행한 계단형 스트레스 시험에 따라 n 값을 산출할 수 있음을 보여주고 있으며, 이는 전기적 수명 평가 시험을 수행하기 위한 시험 시간을 수일 이내로 획기적으로 단축시킬 수 있음을 보여주고 있다.

2.3 계단형 전계에 의한 수명 평가 결과 비교

에폭시 절연물의 B_5 수명 산출을 위하여 각 계단형 전계 시험에서 측정된 절연파괴 시간들이 따르는 확률분포를 추정하였고, 이는 와이블 분포에 가장 잘 적합함을 확인하였다. B_5 수명 산출을 위해 와이블 분포의 5% percentile 값을 추정하였고, 이 값을 이용하여 minimum distance method [3]를 적용하여 최적의 n 값과 D_c 값을 추정하였다. 결과적으로, 사용 전계 5.5 kV/mm에서 추정된 B_5 수명은 표 1을 참고한다. 이는 여러 문헌에서 제시되는 값과 유사한 값을 보여주고 있어서, 계단형 전압 인가 시험에 의한 전기적 수명 평가 방법의 타당성을 확인할 수 있었으며, 계단형 전계 인가 시험에 의해 기존 수개월 이상 걸리는 수명 시험을 수일 이내로 단축시킬 수 있음을 확인하였다.

〈표 1〉 에폭시 절연물 전기적 수명 평가 결과

사용 전계	Estimated n	Estimated Dc	B_5 추정 수명
5.5 kV/mm	16.69	2.383E+19	20 years

3. 결 론

본 논문에서는 전력기기 에폭시 절연물의 전기적 수명 평가를 위하여 일정 전계 대신 계단형 전압 스트레스를 인가한 후, 누적 손상 모델과 역누승 관계식을 결합한 방법을 통해 시험 시간을 단축하는 방법의 타당성을 확인하고자 하였다. 계단형 전압 인가를 통해 다양한 방법에 의하여 역누승 관계식의 n 값을 산출하였고, 일정 전계 시험 결과와 비교하여 그 타당성을 확인하였으며, 수개월 이상 걸리는 시험 시간을 수일 이내로 단축시킬 수 있음을 확인하였다. 또한, 사용 전계에서의 B_5 수명을 산출하여, 계단형 전압 인가 수명 평가 방법의 타당성을 확인하였다.

감사의 글

본 연구에서 수행된 전기적 수명 시험은 2024년도 LS 일렉트릭과 충북대학교와의 산학 협력 과제 (과제명: 배전반 수명 평가 고도화 기술 연구)에 의하여 이루어진 연구입니다. 관계부처에 감사 드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] A. P. S. Tiwana and C. C. Reddy, "Life estimation using damage equalization method and step-stress breakdown tests", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016
- [2] B. S. Thind, et al., "Modified damage equalization method for lifetime estimation of dielectrics", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021
- [3] T. Liu, et al., "A new method of estimating the inverse power law ageing parameter of XLPE based on step-stress tests", 2013 Annual Conf. Elec. Insul. Dielec. Phenom.
- [4] Y. Xiao, et al., "Cumulative damage threshold bands of LDPE and its role in DC lifetime model determination", IEEE Conf. on the Propert. Appl. Dielec. Mat., 2024